



**Titre:** Caractérisation du refroidissement par convection forcée  
Title: horizontale d'une flotte de robots miniatures

**Auteur:** Pascal Hannoyer  
Author:

**Date:** 2006

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Hannoyer, P. (2006). Caractérisation du refroidissement par convection forcée  
Citation: horizontale d'une flotte de robots miniatures [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7890/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7890/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:**  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DU REFROIDISSEMENT PAR CONVECTION FORCÉE  
HORIZONTALE D'UNE FLOTTE DE ROBOTS MINIATURES

PASCAL HANNOYER  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE INFORMATIQUE)  
AOÛT 2006

©Pascal Hannoyer, 2006.



Library and  
Archives Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Published Heritage  
Branch

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file    Votre référence*

*ISBN: 978-0-494-19306-8*

*Our file    Notre référence*

*ISBN: 978-0-494-19306-8*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

  
**Canada**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

CARACTÉRISATION DU REFROIDISSEMENT PAR CONVECTION FORCÉE  
HORIZONTALE D'UNE FLOTTE DE ROBOTS MINIATURES

présenté par: HANNOYER Pascal

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. GUIBAULT François, Ph.D., président

M. MARTEL Sylvain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. DAGENAIS Michel, Ph.D., membre

## DÉDICACE

*Just stay cool...*

## REMERCIEMENTS

Si je devais remercier tout le monde qui m'a non seulement aidé durant ma maîtrise mais qui m'a aussi supporté, écouté, conseillé, j'aurais trop de noms à écrire et j'aurais trop peur d'en oublier. Je préfère donc ne pas mentionner de noms en espérant que toutes et tous sauront dans quelles catégories ils tombent. Cependant, je ne peux pas me permettre de ne pas mentionner la personne qui m'a confié ce projet, le directeur de notre laboratoire Sylvain Martel. Il aura été source de nombreuses remarques qui auront toujours permis de faire progresser pas par pas le projet dans la bonne direction et je lui en suis reconnaissant.

D'abord j'aimerais remercier ma famille. Vous m'avez toujours donné la liberté dont j'avais besoin pour trouver mon propre chemin et lorsque j'étais sur le point de tomber, vous avez toujours été là pour m'attraper et me remettre sur mes pieds.

À tous mes amis, à tous les jours vous m'apportez quelque chose de nouveau et vous me permettez d'apprendre à me connaître un peu mieux. Il y a certains d'entre vous que j'aimerais particulièrement remercier juste d'avoir été là lorsque j'avais besoin de vous. Je sais qu'il n'est pas toujours évident de savoir comment réagir avec moi mais je ne pense pas qu'il y en a de mauvaises.

Enfin je vais remercier mes collègues du laboratoire et de Polytechnique. Vous avez commencé à me connaître à un moment très étrange de ma vie et vous m'avez vu évoluer jusqu'à la personne d'aujourd'hui, j'espère que c'était un bon spectacle car vous avez été un bon public. J'ai appris beaucoup en votre compagnie non seulement sur un niveau académique mais aussi social et culturel d'où j'en sors une meilleure personne.

Pour conclure, j'espère avoir su rendre tout ce dont vous m'avez donné.

## RÉSUMÉ

Cette recherche a pour objectif de caractériser et améliorer le fonctionnement d'une chambre de refroidissement destinée à accueillir une flotte de robots mobiles. Étant donné que nous utilisons le refroidissement par convection forcée, il était important de savoir comment se comporte le flux de gaz qui circule dans la chambre sur la zone de travail. Il était aussi important de trouver les limites de la chambre en fonction de la puissance dégagée par les robots, de leur répartition et de leur orientation sur la zone de travail.

Cette étude aura permis de trouver que, pour un flux de gaz non uniforme mais symétrique par rapport à l'axe central de la chambre, le système peut refroidir et contrôler thermiquement une flotte de 100 robots dégageant chacun 10W de puissance afin que la température entre le robot le plus chaud et le plus froid ne dépasse pas 70°C. Cet intervalle permet de recourir à la majorité de l'électronique conventionnelle. Une des principales conclusions tirées de ce travail est que pour pouvoir contrôler la température de robots qui génèrent plus de 10W de puissance chacun, il faut refroidir les robots avec un flux d'au moins 0.3m/s. Ceci signifie soit placer les robots dans les zones avec un flux d'au moins 0.3m/s ou bien modifier la chambre de refroidissement pour avoir un flux plus uniforme sur toute la surface de travail.

Les modifications apportées à la chambre lors de l'étude auront aussi permis de réduire les oscillations thermiques maximum sous les 5°C et d'atteindre un régime permanent en moins d'une heure. Suite aux modifications qui ont rendu le système stable, on peut espérer pouvoir modéliser et simuler le fonctionnement du système.

## ABSTRACT

This study had the following objectives which are the characterisation and the improvement of a cooling chamber destined to accommodate a fleet of mobile robots. Because forced convection is used in this system for cooling, it was important to represent the gas flow over the working surface. It was also important to find out how much power each robot could dissipate, without overheating, inside the chamber depending on their distribution and angle over the working surface.

It was determined that, for a non uniform gas flow but in symmetry over the central axis of the chambers working surface, the system can cool down and control the temperature of a fleet of 100 robots each dissipating 10W of power in order to maintain the difference in temperature between the warmest and coldest robot under 70°C. This difference allows the use of most conventional electronics. One of the main conclusions of this work is that, in order to control the temperature of robots each exceeding 10W of power, a gas flow of at least 0.3m/s is necessary to cool the robots. This means that the robots must either be placed on the working surface inside zones where the gas flow exceeds that speed or modify the cooling chamber in order to have a uniform flow over the entire working surface.

The modifications brought to the chamber during this study reduced the largest temperature oscillations under 5°C and to achieve a steady state in less than an hour. Because of these modifications, we hope to be able to model and simulate how the robots work.



## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iv
REMERCIEMENTS .....	v
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT .....	vii
TABLE DES MATIÈRES .....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xiii
I. INTRODUCTION .....	1
II. INTRODUCTION AU PROJET NANOWALKER.....	4
A. Le robot NanoWalker .....	4
1. Instrumentation (STM).....	4
2. Locomotion .....	5
B. Environnement du NanoWalker .....	6
1. Le système de positionnement .....	6
2. Communication infrarouge .....	7
3. Le plancher d'alimentation .....	7
4. L'unité centrale de contrôle .....	8
5. La plateforme : la chambre de refroidissement.....	8
III. LA CHAMBRE DE REFROIDISSEMENT.....	9
A. Rappels de thermodynamique.....	9
1. Conduction (transmission solide).....	9
2. Radiation (transmission dans le vide) .....	10
3. Convection (transmission gazeuse).....	11
B. La chaleur et le robot NanoWalker.....	12
1. Puissance du NanoWalker.....	13
2. Conséquences pour le robot .....	13
C. Solution adoptée .....	14
1. Nos contraintes.....	14
2. La forme de refroidissement choisie .....	15

3. Choix de l'architecture entrée/sortie des flux .....	19
4. Composantes de la chambre de refroidissement .....	20
IV. EXPÉRIMENTATION .....	35
A. Modèle théorique .....	35
B. Amélioration du comportement .....	39
1. Tests à l'air .....	39
2. Utilisation de l'hélium comme médium de refroidissement .....	44
3. Contrôle de la température à l'entrée de la chambre .....	45
4. Réduction du volume de la chambre .....	47
5. Utilisation d'un PID automatique .....	51
6. Injection directe à l'azote liquide .....	54
C. Tests de caractérisation .....	58
V. DISCUSSION .....	62
A. Limites de la chambre .....	62
1. Puissance .....	62
2. Turbulences .....	63
3. Influence du nombre et de la grosseur des robots .....	64
B. AUTRES CONSIDÉRATIONS .....	64
1. Tests futurs .....	65
C. Recommandations pour le projet NanoWalker .....	68
1. Pour le robot .....	68
2. Pour la chambre de refroidissement .....	69
VI. CONCLUSION .....	70
BIBLIOGRAPHIE .....	72

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 4.2.6.1 – Variation des gains du PID selon les étapes.....	56
Tableau 4.2.6.2 – Comparaison du test à l’azote liquide avec celui à l’hélium. ....	57
Tableau 4.3.1 – Comparaison du test à l’azote liquide avec celui à l’hélium. ....	60

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1.1.1 – Illustration des phénomènes du STM parcourant une surface.....	5
Figure 2.1.2.1 – Mouvement d'un tube piézoélectrique. ....	6
Figure 2.2.3.1 – Dessin du PowerFloor et illustration de l'alimentation du robot.....	8
Figure 3.1.1.1 – Schéma de la conduction. ....	10
Figure 3.1.2.1 – Radiation d'une surface. ....	11
Figure 3.1.3.1 – Convection forcée sur une surface. ....	12
Figure 3.2.2.1 – Allongement d'un piézoélectrique en fonction de la température [Physik Instrumente].....	14
Figure 3.3.2.1 – Coefficients de convection moyen [Schindler 2002]. ....	16
Figure 3.3.3.1 – Les trois configurations de flux étudiées lors de la conception. ....	19
Figure 3.3.3.2 – Représentation du flux dans la chambre.....	20
Figure 3.3.4.1 – Photo de la configuration initiale du système de refroidissement. ....	21
Figure 3.3.4.2 – Échangeur de chaleur. ....	22
Figure 3.3.4.3 – Photos du système de contrôle et de la valve pneumatique.....	23
Figure 3.3.4.4 – Représentation du fonctionnement de l'ancien système. ....	24
Figure 3.3.4.5 – Photo d'un DummyWalker.....	25
Figure 3.3.4.6 – Photo d'un port pour câbles. ....	25
Figure 3.3.4.7 – Photo du DummyFloor.....	26
Figure 3.3.4.8 – Graphique représentant le flux de gaz (m/s) dans la configuration initiale.....	28
Figure 3.3.4.9 – Photo de la souffleuse.....	29
Figure 3.3.4.10 – Photo de l'intérieur du diffuseur à l'entrée de l'enceinte. ....	31
Figure 3.3.4.11 – Graphique du flux (m/s) dans la configuration amélioré.....	32
Figure 3.3.4.12 – Photo de la configuration amélioré du système de refroidissement....	33
Figure 3.3.4.13 – Représentation du fonctionnement du système actuel. ....	33
Figure 4.1.1 – Modèle initiale des robots sur la surface de travail.....	35
Figure 4.1.2 – Modèle empirique du système. ....	36
Figure 4.1.3 – Modèle qui divise le système en deux.....	37
Figure 4.1.4 – Échanges de chaleur entre la chambre et l'extérieur.....	38

Figure 4.2.1.1 – Représentation et photographie des thermocouples lors des tests. ....	40
Figure 4.2.1.2 – Test utilisant l’air. ....	42
Figure 4.2.1.3 – Température selon la vitesse du flux. ....	43
Figure 4.2.2.1 – Test utilisant l’hélium. ....	44
Figure 4.2.3.1 – Test utilisant l’hélium mais avec contrôle de l’entrée. ....	46
Figure 4.2.4.1 – Zone de travail étudiée selon la hauteur des instruments. ....	48
Figure 4.2.4.2 – Couche de plexiglass placée à mi-hauteur de la chambre. ....	49
Figure 4.2.4.3 – Test utilisant l’hélium mais avec le volume réduit. ....	50
Figure 4.2.5.1 – Test à l’hélium avec le PID automatique. ....	53
Figure 4.2.6.1 – Test à injection directe avec le PID automatique. ....	55
Figure 4.3.1 – Différentes dispositions de DummyWalkers. ....	58
Figure 4.3.2 – Test à injection direct avec disposition en angle et décalée. ....	59
Figure 5.1.1 – Représentation des zones avec un flux suffisant (2) et insuffisant (1) et (3). ....	62
Figure 5.2.1 – Surface qui réagit avec le flux selon l’angle du robot. ....	65
Figure 5.2.2 – Mouvement du flux entre les robots selon leur disposition. ....	66

## **LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

AFM : microscope à force atomique (Atomic Force Microscope)

NI: National Instruments

PID : contrôleur proportionnel, intégral, dérivé

PLC : automate programmable industriel (Programmable Logic Controller)

PSD : positioning sensing device

RPM : rotations par minute

STM: microscope à effet tunnel (Scanning Tunnelling Microscope)

## I. INTRODUCTION

Une chose fascinante se produit lorsqu'on diminue énormément de taille. On remarque que les propriétés physiques peuvent changer de façon inattendue lorsqu'on atteint de très petites dimensions. Par exemple, le cuivre qui est normalement un très bon conducteur devient un isolant lorsque constitué en très petites couches soumises à un champ magnétique. Aujourd'hui, à travers le monde on retrouve des centres de recherches qui essaient de trouver des structures avec de nouvelles propriétés [Natasha Loder 2004]. On nomme nanotechnologies des moyens techniques qui regroupent un nombre important d'outils d'observation, d'analyse, de préhension, de manipulation et de fabrication d'objets dont une dimension au moins est inférieure à 10nm [Observatoire français des techniques avancées 1992]. Ce sont ces technologies qui nous permettent d'atteindre le règne de l'atome. En général, ces structures sont difficiles et longues à construire. Pour les réaliser, on désire avoir recours à une chaîne de montage pour accélérer la production. Un nouvel intérêt maintenant s'ouvre envers des robots qui pourront utiliser ces nouvelles technologies pour automatiser des processus de fabrication. Un robot étant défini comme un dispositif mécanique qui peut être programmé pour exécuter des tâches de manipulation ou de locomotion sous commande automatique [Association canadienne de normalisation 1992]. La nanorobotique est la conception de systèmes robotiques pas nécessairement de dimension nanométrique mais utilisant des nanotechnologies pour atteindre le niveau du nanomètre.

Idéalement, ces robots pourront effectuer de nombreuses tâches à l'aide d'instruments nanotechnologiques et fonctionner en concert avec d'autres. Le but de fonctionner en parallèle est d'augmenter la densité d'instruments de travail sur une même surface de travail et ainsi réduire le temps de fabrication. Une autre façon d'augmenter cette densité sur la surface de travail est de fabriquer des robots toujours plus petits et performants donc pouvant effectuer des tâches constamment plus complexes. Ces tâches nécessitent un grand nombre de composants qui dégagent tous de

la chaleur et ayant chacun des limites de températures de fonctionnement. Un problème survient alors lorsque le robot diminue trop en taille, éventuellement il devient trop petit pour pouvoir évacuer toute la chaleur que ses composants produisent de façon naturelle dans l'atmosphère ambiant. La capacité du robot à dégager la chaleur qu'il accumule devient alors une limite à la réduction de sa taille. Pour repousser ces limites, il faut développer des méthodes de refroidissement pour le robot.

Présentement le *NanoWalker* [Martel S. 1999] est le seul robot qui rencontre ce type de problème du fait qu'il comprend non seulement un instrument nanotechnologique mais aussi un système de déplacement précis et rapide, en plus d'un système de communication sans-fil. Mentionnons que l'ensemble de ces éléments est confiné sur un robot de la taille d'un pouce cube. Pour effectuer ces tâches, on doit utiliser des composants énergivores qui malheureusement génèrent suffisamment de chaleur pour atteindre les limites de fonctionnement en température des composants du robot.

Il existe de nombreuses méthodes de refroidissement en microélectronique dont des *heats-sinks* (dissipateurs de chaleur ou puits de chaleur), des ventilateurs, des dispositifs à effet Peltier [Wikipedia], la submersion dans un liquide froid et autre. La plupart de ces méthodes font augmenter la grosseur du robot ou bien affectent le déplacement ou la précision de l'instrument du robot qui, dans notre cas, est un STM (de l'acronyme anglais Scanning Tunneling Microscope pour microscope à effet tunnel). Notre solution fût d'utiliser de la convection forcée pour refroidir le robot. Il fût jugé que cette forme de refroidissement externe interférerait peu avec la conception du robot tout en arrivant à dégager toute sa chaleur excessive et n'affecterait en rien sa taille [Martel S. 2003].

Une chambre de refroidissement utilisant de la convection forcée pour refroidir les *NanoWalkers* fut développée et construite au Laboratoire de NanoRobotique de



l'École Polytechnique de Montréal. Cette chambre de refroidissement a pour but de permettre à la flotte de robots de fonctionner en parallèle sur une même surface de travail. En contrepartie, notre chambre de refroidissement ne permet pas de contrôler la température des robots individuellement mais comme un ensemble ce qui en complique le contrôle.

La chambre utilise la convection forcée pour refroidir les robots mais cette méthode présentera des limites pour des robots plus petit compte tenu de la diminution de la surface d'échange. Il faudra alors utiliser d'autres méthodes telle que la radiation et ou la conduction pour refroidir les robots. Des études sont en cours au laboratoire pour résoudre les problèmes d'échelles, parmi lesquels les *microheatpipes* (microcaloducs) [Bey Oueslati 2006] qui devraient aider à transporter la chaleur de l'intérieur du robot vers l'extérieur. Une nouvelle chambre de refroidissement est en développement pour étudier le comportement thermique de robots de la taille du millimètre. Par ailleurs, la prochaine version du *NanoWalker* est en cours de développement. Le nouveau robot devrait être environ 3 fois plus petit que l'actuel et sa puissance de fonctionnement devrait être moindre. Cependant, on prévoit des limites thermiques pour le nouveau robot. Tous ces travaux permettront de repousser la limite de puissance qu'un robot doit respecter pour fonctionner à l'intérieur de ses contraintes thermiques.

Cette étude permettra de trouver les limites de puissance d'un robot utilisant une chambre de refroidissement pour contrôler sa température. Dans le futur, il sera possible d'intégrer un ou plusieurs systèmes de refroidissement au robot, mais pour l'instant on désire étudier l'efficacité de la chambre seule. Pour ce faire, on va utiliser plusieurs types de gaz comme refroidissant et on étudiera l'effet de l'orientation et de la disposition des robots sur la capacité de refroidissement du système.

## II. INTRODUCTION AU PROJET NANOWALKER

### A. Le robot *NanoWalker*

Le projet *NanoWalker* vise à développer des robots miniatures qui pourront effectuer des manipulations à l'échelle atomique. Pour arriver à faire ce type de travail, le robot utilise un STM. Avec le *NanoWalker*, on essaye de construire un robot miniature sans-fil qui peut non seulement atteindre le niveau atomique mais aussi se déplacer rapidement, à l'aide d'un système de locomotion unique, et se positionner très précisément, grâce à un système de positionnement par étage. Les différents éléments du *NanoWalker* seront décrits dans l'une des sections ci-dessous. De façon générale, ce projet s'inscrit dans un concept de nano-usine où une flotte de robot munie d'instruments ou d'outils distincts pourra exécuter simultanément des tâches différentes.

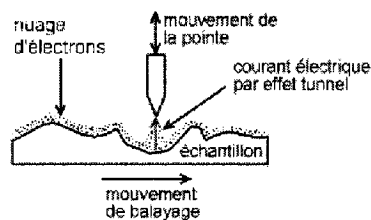
#### 1. Instrumentation (STM)

Le *NanoWalker* utilise présentement un STM comme instrument pour exécuter ses tâches au niveau atomique [Boitani 2003].

Le STM est grandement utilisé dans l'industrie et dans la recherche fondamentale pour réaliser des images au niveau atomique de surfaces de métal. Il permet d'obtenir un profil en trois dimensions de la surface qui est très utile pour en caractériser la rugosité, les défauts et pour déterminer la grosseur et la configuration d'agrégats et de molécules de cette surface. Plusieurs autres appareils utilisent aussi une technologie dérivée de la technologie de balayage microscopique développée pour le STM, comme par exemple un microscope à force atomique ou 'atomic force microscope' (AFM) [Baselt 1993].

Pour comprendre le fonctionnement du STM, il faut savoir que le nuage d'électrons associé aux atomes de métal appartenant à une surface s'étend sur une très

courte distance au-dessus de la surface. Quand on approche une pointe très fine suffisamment proche d'une surface, une pointe qui en pratique n'a qu'un seul atome à son extrémité, il y a une forte interaction entre le nuage d'électron et l'atome au bout de la pointe. Des électrons peuvent alors sauter de la surface à la pointe. Un courant à effet tunnel peut alors être généré lorsqu'on applique un voltage entre les deux bornes qui ne sont pas en contact (voir figure 2.1.1.1). Ceci est seulement possible à une distance de quelques atomes. Le courant augmente très rapidement lorsque la distance entre les deux objets diminue. Ces changements rapides de courant peuvent être utilisés pour obtenir une image avec une résolution atomique lorsque l'on balaye la surface à l'aide de la pointe [Young, Ward et Scire 1972] [Young 1966] [Young 1971][Young., Ward, et Scire 1971].



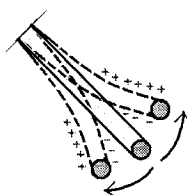
**Figure 2.1.1.1 – Illustration des phénomènes du STM parcourant une surface**

En mode courant constant, la hauteur de la pointe du STM par rapport à l'échantillon sera modifié durant le balayage pour conserver un courant tunnel constant. Il suffit alors de déterminer la position de la pointe en X,Y et Z pour reproduire l'allure de la surface. Plus la position de la pointe sera connue avec précision, meilleure sera la résolution de notre image. Compte tenu des faibles distances mises en cause, il apparaît clairement qu'il suffit d'une faible variation de température pour perturber le bon fonctionnement de ce type d'instrument.

## **2. Locomotion**

Le *NanoWalker* utilise trois pattes en tubes piézoélectriques [APC International] placées en tripode pour se déplacer. Les pattes du *NanoWalker* utilisent des tubes

piézoélectriques, la figure 2.1.2.1 illustre le mouvement d'une patte ayant une paire d'électrodes :



**Figure 2.1.2.1 – Mouvement d'un tube piézoélectrique.**

Selon le signe du voltage appliqué aux pattes, on génère soit un mouvement de la patte vers le haut ou vers le bas. Avec ce type de configuration, on peut aussi allonger ou raccourcir la longueur de la patte si on applique le même voltage sur les deux électrodes. Sur le NanoWalker, il fut décidé de placer quatre électrodes sur chaque patte du NanoWalker afin de pouvoir effectuer des mouvements d'extension axiale, de contraction radiale et de déflexion latérale pour que le robot ait ainsi la plus grande liberté de mouvements [Fortin 2005]. L'utilisation d'actionneurs piézoélectriques permet des forces importantes ainsi que des déplacements précis. Enfin, la disposition des pattes fût étudiée et choisie pour permettre une vitesse de déplacement optimale [Fortin 2005]. Les déplacements souhaités pour positionner le STM sur une zone de travail étant submicroniques, il est important de contrôler la température pour le bon fonctionnement des piézoélectriques constituant les pattes du robot.

## ***B. Environnement du NanoWalker***

### **1. Le système de positionnement**

Le système de positionnement fonctionne en 2 niveaux. Premièrement, on utilise une caméra infrarouge de type PSD ( '*positioning sensing device*') pour positionner grossièrement le robot sur la surface de travail. Ce système permet de positionner le robot avec une résolution de  $\pm 150\mu\text{m}$ . Le deuxième niveau est constitué d'une grille de

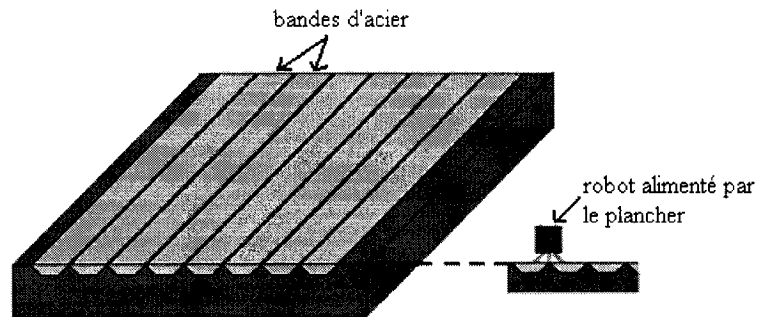
positionnement. À l'aide du STM et de motifs particuliers gravés sur la grille, un algorithme de positionnement nous permet de passer de la première zone de  $\pm 150\mu\text{m}$  jusqu'à notre zone de travail qui correspond à la déflexion du STM [Dumas 2003][Baumann 2003].

## **2. Communication infrarouge**

Pour assurer l'échange d'information entre les différents robots de la flotte et la plateforme informatique qui contrôle le système, utilise un système de communication infrarouge qui est en cours de développement. [Zhang 2006]

## **3. Le plancher d'alimentation**

Pour alimenter le robot, il aurait été possible d'envisager l'utilisation d'une pile mais cela causait deux problèmes, les piles doivent être remplacées ou rechargées après utilisation mais surtout, la pile doit être placée sur le robot. Avec le souci de minimiser les dimensions du robot, une méthode d'alimentation externe au robot fût adoptée. La décision finale s'arrêta sur le plancher d'alimentation ou comme on le nomme au laboratoire le « *PowerFloor* ». Le plancher sur lequel repose le robot est subdivisé en bandes d'acier parallèles entre elles (voir figure 2.2.3.1). On alimente successivement chaque bande voisine l'une avec une tension positive et l'autre avec une tension opposée négative. Le but est de faire en sorte que les pattes du robot maintiennent en tout temps un contact avec deux bandes contiguës. La différence de tension qui en résulte assure l'alimentation du robot.



**Figure 2.2.3.1 – Dessin du PowerFloor et illustration de l'alimentation du robot.**

#### **4. L'unité centrale de contrôle**

Pour gérer l'ensemble des robots sur la surface de travail et leur environnement, on a développé un système d'exploitation qu'on nomme NanoOS [St-Jacques 2004]. Ce système doit s'assurer du fonctionnement des robots, contrôler leurs déplacements, transmettre des instructions, enregistrer les images des STM et surveiller leur température.

#### **5. La plateforme : la chambre de refroidissement**

La chambre de refroidissement constitue la plateforme qui accueille les robots, délimite leur espace de travail et assure un bon fonctionnement des *NanoWalkers* en contrôlant leur température. Le chapitre suivant est consacré à sa description et son fonctionnement, il n'y a pas intérêt de s'y attarder ici si ce n'est pour souligner l'importance de son rôle.

### III. LA CHAMBRE DE REFROIDISSEMENT

La chambre de refroidissement utilisée dans le cadre du projet *NanoWalker* utilise principalement la convection forcée pour refroidir les robots mais ce n'est pas la seule forme d'échange de chaleur qui agit dans la chambre. Ce chapitre rappelle les différentes formes d'échange de chaleur qui existent en thermodynamique. Il y sera présenté également les différents composants de la chambre.

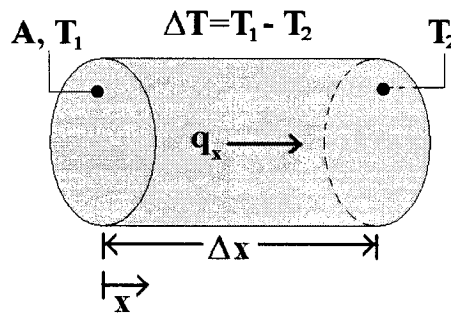
#### A. *Rappels de thermodynamique*

Un transfert de chaleur s'effectue normalement entre un objet à haute température vers un objet à une température plus basse. Il change l'énergie interne des deux systèmes impliqués selon la première loi de la thermodynamique soit le principe de la conservation de l'énergie. Comment s'échange la chaleur? Il existe trois façons d'échanger de la chaleur : la conduction, la convection et la radiation.

##### 1. Conduction (transmission solide)

L'échange de chaleur par conduction implique le transfert d'énergie à l'intérieur du matériau sans qu'il y ait de mouvement d'ensemble dans ce dernier. Le rythme d'échange de chaleur dépend de l'écart de température et de la conductivité thermique du matériau. Les fluides échangent de la chaleur par collisions directes entre leurs molécules, c'est un échange d'énergie cinétique. Les solides non métalliques échangent de la chaleur à travers les vibrations dans leurs structures internes (*'lattice vibrations'*), il n'y a donc pas de déplacements de matière pendant que l'énergie transite. Les métaux sont de meilleurs conducteurs que les solides non métalliques parce que les mêmes électrons mobiles qui participent dans la conduction d'électricité prennent aussi part au transfert de chaleur [Nave].

La figure 3.1.1.1 représente la transmission d'énergie par conduction dans un cylindre où la température est constante dans une section transversale mais différente aux deux extrémités.



**Figure 3.1.1.1 – Schéma de la conduction.**

Le transfert de chaleur dépend non seulement de l'écart de température mais aussi de la surface, de la conductivité et de la distance entre les deux surfaces. Le transfert de chaleur  $q_x$  est donné par l'équation suivante :

$$q_x = k.A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1.1.1)$$

où :  $k$  est la conductivité thermique du matériau.

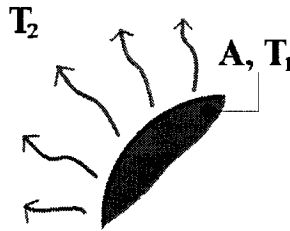
Le robot transfère de la chaleur au plancher d'alimentation au travers de ses pattes par conduction.

## **2. Radiation (transmission dans le vide)**

La radiation est un transfert de chaleur par émission d'ondes électromagnétiques qui transportent de l'énergie hors de l'objet qui émet. Pour des températures ordinaires (longueurs d'onde comprises entre 700 nm et 1 mm), la radiation est dans les infrarouges du spectre électromagnétique [Wikipedia].



La figure 3.1.3.1 représente l'émission de radiation d'une surface A de température  $T_1$  vers le milieu ambiant de température  $T_2$ .



**Figure 3.1.2.1 – Radiation d'une surface.**

La loi qui gouverne la radiation d'un objet chaud est nommée la loi de Stefan-Boltzmann :

$$P = e\sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.1.2.1)$$

où : P est la puissance et  $e$  est l'émissivité du matériel tandis que  $\sigma$  est la constante de Stefan.

Chaque robot transfère de la chaleur avec les autres robots et les murs de la chambre de refroidissement par radiation.

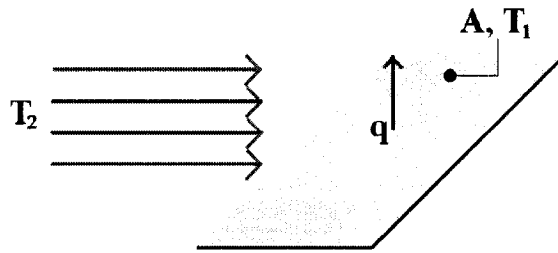
### **3. Convection (transmission gazeuse)**

La convection est le transfert de chaleur par courants à l'intérieur d'un fluide. Elle peut provenir de différences de températures à l'intérieur du fluide ou bien entre le fluide et sa frontière.

On distingue deux types de convection, la convection libre et la convection forcée. Dans le cas de la convection libre, le fluide chaud devient moins dense et flotte tandis que le fluide plus froid coule. Le mouvement de la convection libre se produit lorsqu'un liquide ou un gaz soumis à un champ d'accélération, comme la gravité ou une force centrifuge, change de volume dû à plusieurs températures. La convection forcée se

produit lorsque les courants du fluide sont générés de façon externe avec par exemple un ventilateur ou une pompe [Wikipedia].

La figure 3.1.2.1 représente un fluide de température  $T_2$  qui entre en contact avec une surface A de température  $T_1$ .



**Figure 3.1.3.1 – Convection forcée sur une surface.**

La formule qui régit le rythme de transfert de chaleur  $q$  est :

$$q = (T_1 - T_2) \int h dA \quad (3.1.3.1)$$

où :  $h$  est le coefficient de convection local sur la surface A. Si on nomme  $\bar{h}$  le coefficient de convection moyen sur la surface A, l'équation du rythme de transfert de chaleur devient :

$$q = A \bar{h} (T_1 - T_2) \quad (3.1.3.2)$$

La chambre de refroidissement utilise principalement la convection forcée pour refroidir les robots.

## ***B. La chaleur et le robot NanoWalker***

Les trois types d'échange thermique décrits précédemment sont présents dans le système. On utilise principalement la convection forcée pour refroidir les robots mais les robots échangent de la chaleur par conduction entre leurs pattes et le plancher d'alimentation. Il y a aussi des échanges thermiques dans le système utilisant la radiation

par exemple entre les robots et les murs de la chambre ou bien entre les robots eux-mêmes.

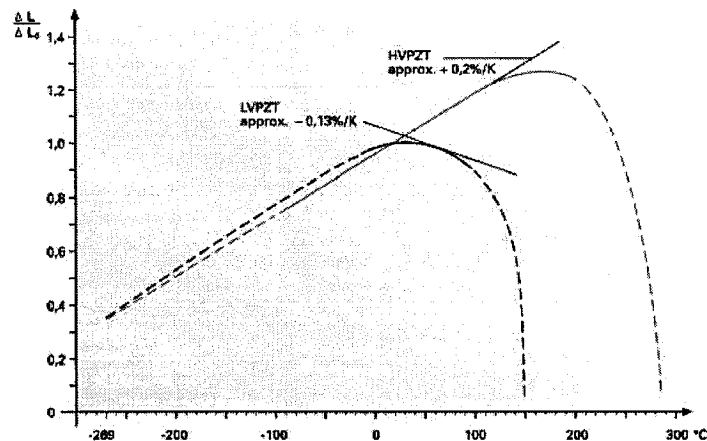
## **1. Puissance du NanoWalker**

Dans sa conception actuelle, la puissance moyenne de chaque NanoWalker est de 15W. La majorité de cette énergie est transformée en chaleur mais une partie de cette énergie est transformée en énergie mécanique. Cette énergie mécanique peut aussi se transformer en chaleur mais n'affectera pas nécessairement le robot.

## **2. Conséquences pour le robot**

La chaleur représente un obstacle au bon fonctionnement du robot. En effet, le volume d'un pouce cube comprend environ 300 composants électroniques dont la majorité exige des températures comprises entre 0 et 70°C. Des tests préliminaires sur des structures similaires (surface d'échange similaire au *NanoWalker*) ont démontré que l'on dépassait 70°C pour des puissances aussi faibles que 5W par convection naturelle.

En plus de l'électronique qui a des limites thermiques de fonctionnement, on rappelle que le *NanoWalker* comporte des structures piézoélectriques (système de locomotion et STM) dont les performances sont sensibles aux variations de température (figure 3.2.2.1). D'après la figure suivante, qui représente l'allongement en fonction de la température, on constate que les variations sont minimisées pour des températures comprises entre 0°C et 70°C. Cette contrainte rejoint celle de l'électronique, cependant les allongements occasionnés par de faible gradient de température seront à considérer pour répondre aux besoins en terme de précision des systèmes de locomotion et du STM.



**Figure 3.2.2.1 – Allongement d’un piézoélectrique en fonction de la température [Physik Instrumente].**

Notre premier objectif lors de la conception d’un système de refroidissement sera d’évacuer toute la chaleur excédentaire des robots et ainsi conserver la température du robot entre 0°C et 70°C pour le bon fonctionnement de l’électronique. Le second objectif est de diminuer les gradients thermiques pour le bon fonctionnement de la locomotion et du STM.

## **C. Solution adoptée**

### **1. Nos contraintes**

Les contraintes du système *NanoWalker* peuvent être résumées selon les points suivants :

- Sensibilité au bruit thermique

Due à la sensibilité de la structure du STM et du système de locomotion aux changements de température, la solution finale devait éviter de causer des gradients excessifs de température.

- Réduction de vibrations

Lorsqu'on effectue des manipulations à un niveau atomique, la moindre vibration peut être catastrophique et il devient alors très difficile d'effectuer des manipulations ou de l'imagerie. Le système de refroidissement qui fût choisi devait donc éviter d'être couplé mécaniquement avec la flotte de robots.

- Systèmes en haut de la surface de travail

Les systèmes de positionnement et de communication sont placés au-dessus de la surface de travail. Ces systèmes occupent une place importante et ont limité certaines des configurations de flux qu'on aurait pu utiliser.

- Superposition des surfaces de travail

Avec le désir d'augmenter la densité de robot, l'idée de superposer des surfaces de travail horizontales est envisagée. On peut alors maximiser chaque surface de travail mais aussi l'espace au-dessus de chaque surface.

## **2. La forme de refroidissement choisie**

Le but est de pouvoir retirer la chaleur du robot et de l'évacuer vers l'atmosphère ambiante. Ceci est d'autant plus difficile, que nous disposons de robots côte à côte et ils échangent tous de la chaleur entre eux. La solution devait donc permettre d'évacuer l'ensemble de la chaleur qui s'accumule sur et autour des robots. De plus, le système doit permettre au robot de fonctionner librement sans réduire ses capacités, tout en respectant notre désir de garder la dimension du robot au minimum. Pour satisfaire ce dernier point, notre système sera idéalement externe au robot.

Ni la conduction ou la radiation peut à elle seule refroidir la flotte de robot. La conduction est insuffisante entre les pattes et le plancher d'alimentation, le bout de la patte du robot étant une sphère, la surface d'échange est trop petite. De plus, lorsque le

robot se déplace, les pattes ne sont pas toujours en contact avec le plancher. Ceci réduit la capacité d'échange par conduction du robot. Pour ce qui est de la radiation, il n'y a tout simplement pas de surface suffisante pour permettre un échange efficacement de la chaleur autre que le plancher d'alimentation et le robot. Ceci est dû à la présence des systèmes de communication et de positionnement au-dessus du plancher et les murs de la chambre n'étant pas parallèle au plancher. Par contre, il n'est pas recommandé de refroidir le plancher d'alimentation pour deux raisons soit le risque d'introduire des vibrations indésirables dans le système due au refroidissant qui circulerait dans le plancher et la possibilité d'avoir une surface de travail non lisse à cause des coefficients de dilatation thermique différents entre les lattes d'acier et le marbre du plancher d'alimentation.

Ces arguments ont mené à l'adoption de la convection forcée. C'est une méthode éprouvée dans l'industrie pour refroidir des systèmes.

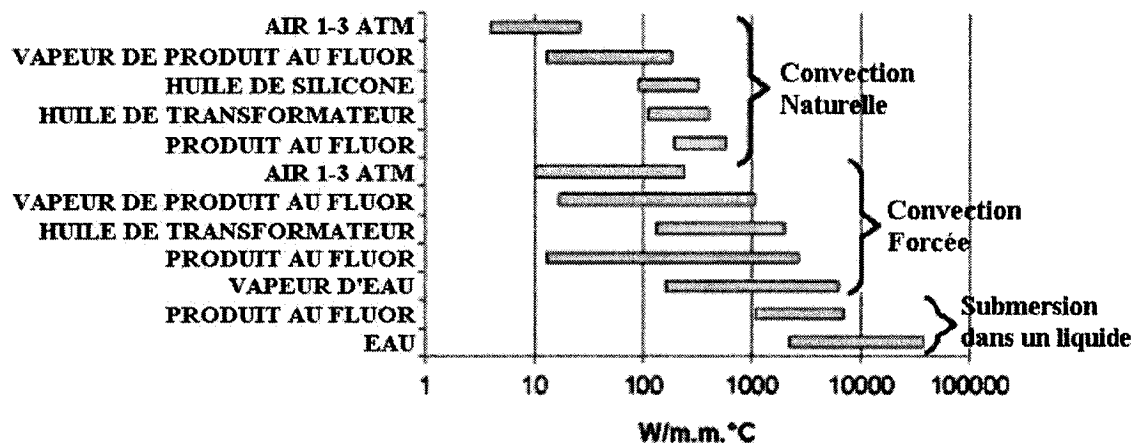


Figure 3.3.2.1 – Coefficients de convection moyen [Schindler 2002].

D'après la figure 3.3.2.1, on remarque que pour l'air entre 1 et 3 ATM, on peut avoir au mieux un coefficient de convection moyen de chaleur de près de 250W/m.m.°C. Pour effectuer une estimation simple, considérons le cas où la convection forcée retirerait la chaleur de seulement une face du robot. On peut alors déterminer si un flux

de gaz à température ambiante arrivera à refroidir le robot. Si on suppose qu'une face de robot représente un carré de 3 cm de côté, que la température maximale du robot est de 70°C et que le courant d'air envoyé sur le robot est de 25°C, la puissance qui peut être dissipée selon (3.1.2.2) est alors  $q = 250 * 0.03^2 * (70 - 25) = 10W$ . Ceci est nettement insuffisant même si on a utilisé le coefficient de convection moyen le plus élevé pour l'air entre 1 et 3 ATM pour faire cet estimé. On ne peut donc pas refroidir les robots à l'aide d'un courant de gaz qui est à température ambiante. Il apparaît donc nécessaire de refroidir le gaz utilisé.

Si on refait le même calcul pour une température de gaz à -50°C, la puissance qui peut alors être dissipée pour la même configuration devient :

$$q = 250 * 0.03^2 * (70 - (-50)) = 27W .$$

Ceci montre qu'à l'aide de la convection forcée à des températures de l'ordre de -50°C, on devrait théoriquement être en mesure d'évacuer la puissance que le robot dissipe.

Si on utilise une souffleuse, qui est composée d'un moteur et d'un ventilateur, pour faire circuler le gaz dans le système, il faut pouvoir isoler les robots des vibrations causées par le moteur. De plus, le flux de gaz doit être assez lent pour ne pas affecter les robots lorsqu'ils se déplacent ou bien lorsqu'ils opèrent.

Il sera toujours possible d'ajouter un *heatsink* ou un dispositif à effet Peltier sur certaines des faces du robot si jamais on observe qu'on n'arrive pas à retirer toute la chaleur par convection forcée seulement, ces dispositifs ne causeront aucune vibration mais peuvent consommer de l'énergie et surtout ils augmentent la grosseur du robot. L'objet de la présente étude est d'évaluer la capacité de refroidissement de la convection

forcée pour une flotte de robots. Si celle-ci s'avère insuffisante, une combinaison de plusieurs méthodes serait envisageable.

Il est certain que la convection forcée aura un effet néfaste sur les gradients de température qui affectent le STM. Pour faire disparaître ce type de variation thermique, il aurait fallu être sous vide, soit les conditions normales de fonctionnement d'un STM mais, d'après la forme du robot et nos contraintes, il n'était pas possible de concevoir un système utilisant la radiation pour refroidir les robots. Par exemple, si on voulait refroidir le plancher sur lequel repose le robot, il faudrait s'assurer qu'en refroidissant le plancher, sa surface reste uniformément lisse pour ne pas présenter d'obstacles aux déplacements des robots.

Il est aussi possible d'envisager une méthode de refroidissement utilisant la conduction pour refroidir les robots, mais ajouter un contact entre le robot et le plancher (ou une autre structure) va affecter les déplacements du robot. On pourrait alors penser utiliser les pattes du robot pour la conduction. C'est en mode de déplacement que le robot dégage le plus de chaleur, c'est aussi le moment où les pattes ne sont pas en contact constant avec le plancher. De plus, les points de contacts entre les pattes et le plancher sont très petits donc la conduction ne serait pas suffisante. La convection forcée est la méthode de refroidissement qui permet à elle seule de refroidir toute la flotte de robots.

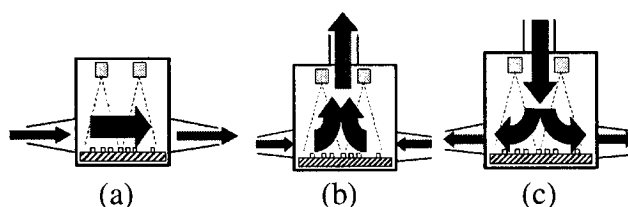
Aucune évaluation numérique n'a été effectuée due à la difficulté de simuler tous les phénomènes qui se produisent à l'intérieur de ce système. Une telle évaluation aurait pris énormément de temps et de ressources et aurait seulement permis de donner une idée générale du comportement de l'enceinte sans plus. Il a donc été décidé de construire la chambre de refroidissement sans simulations. À partir de nos tests sur la chambre de refroidissement, il sera possible de réaliser un modèle qui pourra être utilisé lors



d'évaluations numériques qui permettront de simuler le comportement de différentes configurations d'enceintes.

### 3. Choix de l'architecture entrée/sortie des flux

Trois configurations d'entrée/sortie de flux furent étudiées lors de la conception de la chambre de refroidissement (voir figure 3.3.3.1).



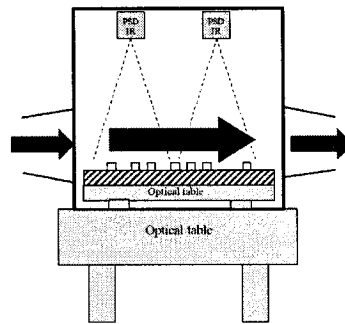
**Figure 3.3.3.1 – Les trois configurations de flux étudiées lors de la conception.**

Les configurations (b) et (c) de la figure précédente représentaient des options intéressantes pour notre système de refroidissement. En effet pour la configuration (b) le flux arrivant de deux entrées différentes, les variations de températures entre les robots auraient été minimisées. En ce qui concerne, la configuration (c), elle aurait permis un flux relativement uniforme sur toute la flotte de robots.

Cependant, le soucis d'une future augmentation de densité de robots par volume, a fait porté notre choix sur la configuration (a) qui nous permettrait d'empiler les surfaces de travail, utilisant ainsi l'axe verticale en plus de la surface.

De plus les configurations (b) et (c) du fait que les flux se rencontrent au centre de l'enceinte dans le cas (b), que le flux rencontre le plancher dans le cas (c) et que les flux rencontrent des robots pour ces deux configurations les turbulences générées pourraient affecter le fonctionnement des robots. En ce qui concerne la configuration (a) des turbulences seront générés seulement lorsque le flux rencontre un robot. Ce qui laisse croire que les turbulences seront moindres pour la configuration (a).

Notre solution est alors d'utiliser de la convection forcée horizontale à l'aide d'un flux de gaz refroidi (représenté sur la figure 3.3.3.2) avec une entrée sur une face verticale de l'enceinte et la sortie sur la face opposée.



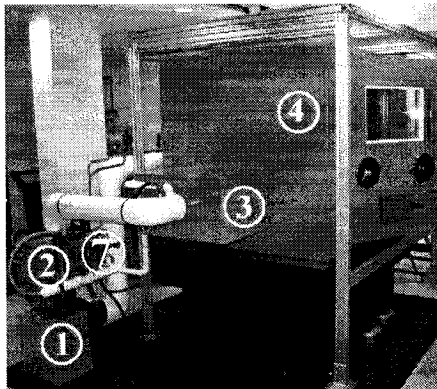
**Figure 3.3.3.2 – Représentation du flux dans la chambre.**

#### **4. Composantes de la chambre de refroidissement**

Dans cette partie, on va présenter les différents éléments de la chambre de refroidissement. Il est important de comprendre chaque partie du système pour en expliquer son fonctionnement. Certains composants ont été modifiés et ajoutés dans le but d'améliorer leur performance.

##### **a) Conception initiale de la chambre de refroidissement**

La figure 3.3.4.1 représente la configuration initiale de la chambre de refroidissement qui a été effectuée avec l'aide de Cryotronix, une entreprise spécialisée dans les systèmes de refroidissement [Schindler 2002], avant la présente étude.



**Figure 3.3.4.1 – Photo de la configuration initiale du système de refroidissement.**

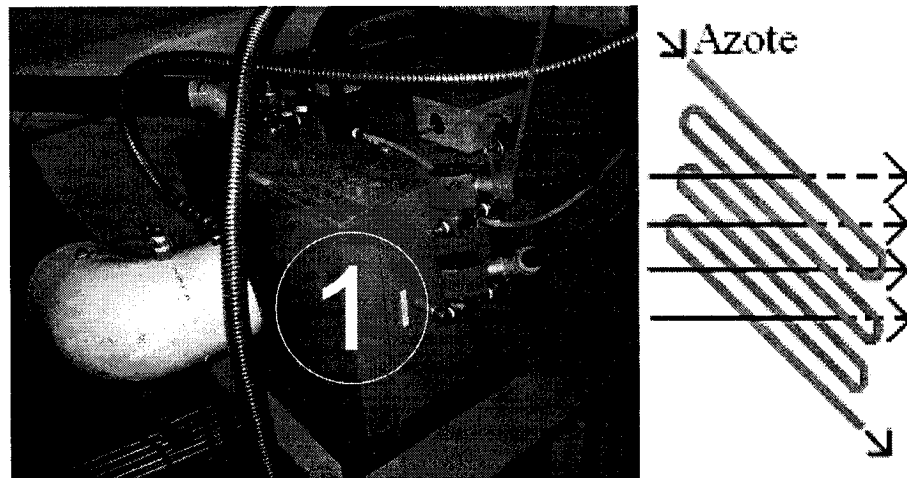
Elle est constituée des principaux éléments suivants :

- La souffleuse (1)

La souffleuse (1) à l'entrée de la chambre permet de générer la convection forcée à l'intérieur du système et comprend : un ventilateur et un moteur.

- L'échangeur de chaleur (2)

L'échangeur sur la photo de la figure 3.3.4.2 est la pièce maîtresse du système. Il permet de refroidir le flux qui y circule. Le système de refroidissement utilisé est un système de type refroidissement cryogénique. Il a été préféré à un système mécanique à base d'un compresseur pour minimiser les vibrations et parce qu'il permet d'atteindre des températures très basses. Il est constitué de 3 couches de tuyaux en cuivre dans lesquels circule de l'azote liquide en circuit fermé. L'échange de chaleur est représenté sur la figure 3.3.4.2 de droite. Les flèches horizontales qui passent du trait plein au trait pointillé représentent le refroidissement du gaz au passage du circuit d'azote liquide.



**Figure 3.3.4.2 – Échangeur de chaleur.**

- Diffuseurs (3)

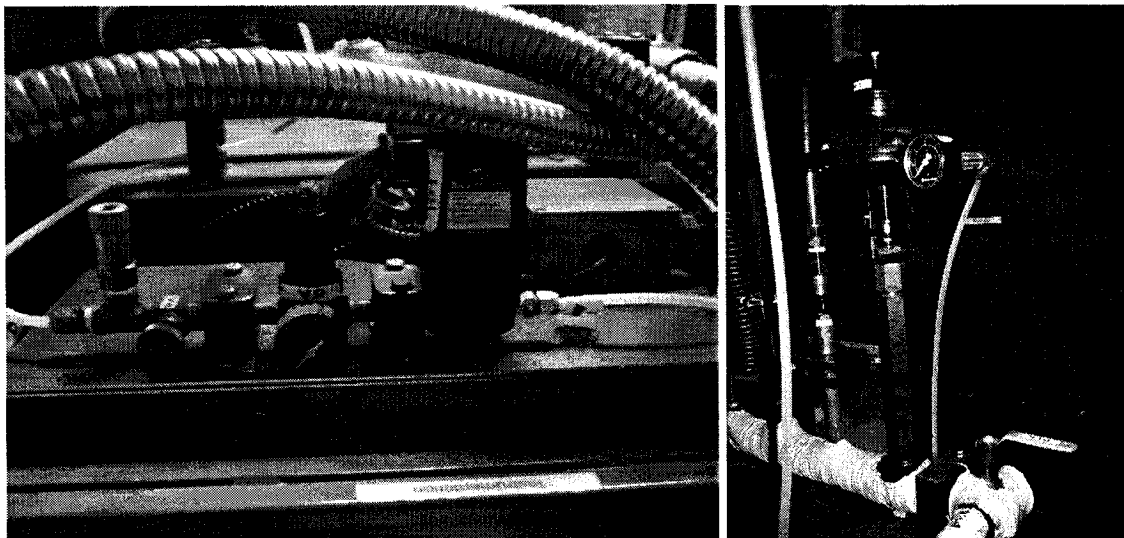
Les diffuseurs (3) en forme de pyramide permettent la transition du flux de gaz entre les conduits étroits vers le volume principal. Leur fonction est de rendre le flux uniforme et d'atténuer les turbulences qui peuvent être créées lorsque un flux rapide pénètre dans un volume relativement large.

- Le volume principal (4)

Le volume principal (4) représente l'enceinte où sont placés les robots. Ses dimensions sont de  $1300 \times 1200 \times 1200$  mm pour l'intérieur et  $1500 \times 1400 \times 1400$  mm pour l'extérieur. L'intérieur des murs est composé d'isolant thermique. C'est à l'intérieur du volume principal que sera placé le *PowerFloor* sur lequel vont fonctionner les robots.

- Valve pneumatique (7)

On utilise une valve pneumatique (7) pour contrôler l'azote liquide qui circule dans l'échangeur ou dans la chambre en mode injection directe. Cette valve est la principale commande de contrôle de la température du système. Selon son ouverture, plus ou moins d'azote liquide circule dans l'échangeur pour refroidir le système.



**Figure 3.3.4.3 – Photos du système de contrôle et de la valve pneumatique.**

Les photos ci-dessus représentent à gauche le système qui contrôle l'ouverture de la valve et à droite la valve pneumatique. Le système de contrôle de la valve est relié au poste de travail qui lui envoie l'ouverture désirée. Le système envoie alors une pression qui permet d'ouvrir la valve pneumatique. Le gaz qui exerce la pression dans la valve est de l'azote. Avant d'atteindre la valve pneumatique, un peu d'azote liquide s'évapore dans les tuyaux, ce gaz est évacué mais une petite partie est redirigée dans les composants qui contrôlent la valve.

Dans cette configuration, le flux de gaz sort de la chambre et parcourt un conduit qui longe l'arrière de la chambre avant d'entrer dans la souffeuse (1). Par la suite, la souffeuse envoie le flux dans l'échangeur (2) situé par-dessus le moteur. Après sa sortie de l'échangeur, le flux ainsi refroidi pénètre dans le diffuseur (3) à l'entrée de la chambre de refroidissement (4). Le schéma bloc de la figure 3.3.4.3 permet de visualiser les différents éléments et leur emplacement dans le circuit de refroidissement :  $T_i$  et  $T_o$  sont les thermocouples à l'entrée et la sortie de la chambre respectivement.  $LN_2$  signifie azote liquide. Dans le schéma, il est possible de remplacer l'air par le gaz de notre choix. Présentement, seul l'air et l'hélium ont été utilisés comme refroidisseurs.

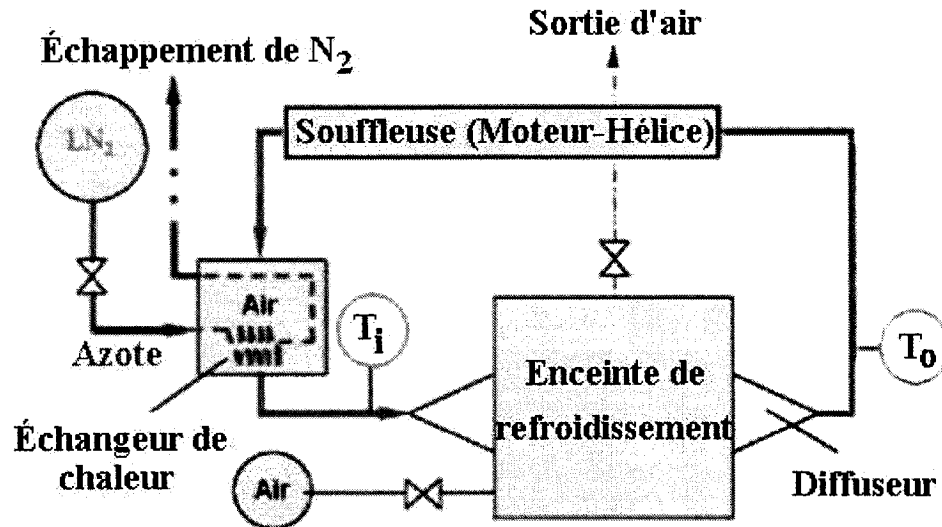


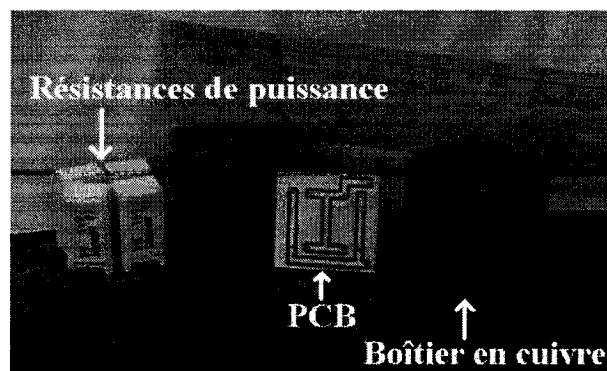
Figure 3.3.4.4 – Représentation du fonctionnement de l'ancien système.

#### b) Plateforme de tests

Pour effectuer les tests, une flotte de faux robots a été construite. Ces robots qu'on nomme '*DummyWalker*' permettent de simuler le comportement thermique d'une flotte de robots sur une surface de travail.

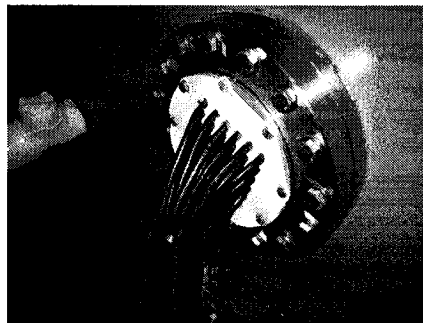
- *DummyWalker*

Les *DummyWalker* (représentés sur la photo 3.3.4.4) sont constitués de quatre résistances de puissance (5W et  $16\Omega$  de chez Micron) montées sur un PCB qui peuvent chauffer jusqu'à une température de  $120^\circ\text{C}$ .



**Figure 3.3.4.5 – Photo d'un DummyWalker.**

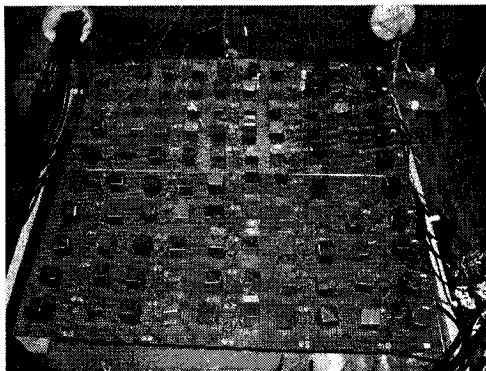
Ils permettent de simuler un robot qui générerait jusqu'à 20W de puissance. Chaque robot est enchâssé dans une carapace de cuivre similaire au volume du futur robot. De plus, pour isoler la chambre de l'extérieur tout en conservant son étanchéité, des ports de câbles furent soigneusement construits pour permettre de faire rentrer tous les câbles nécessaires pour alimenter le *PowerFloor* et les instruments de positionnement et de communication à l'intérieur de la chambre. La photo sur la figure 3.3.4.6 montre le port situé à l'arrière de la chambre. Ces câbles, qui ne peuvent supporter des courants très élevés limitent à 2000W la capacité de notre présente configuration. L'étude a ainsi porté sur une flotte de 100 robots qui peuvent dissiper jusqu'à 20 W chacun.



**Figure 3.3.4.6 – Photo d'un port pour câbles.**

- DummyFloor

Le *DummyFloor* (photo 3.3.4.7) est notre plateforme de test. Il accueille 100 *DummyWalker* alimentés à la même tension. La dimension de la surface a été choisie afin d'être de la même dimension que le futur *PowerFloor* et les robots ont été uniformément répartis sur toute la surface.



**Figure 3.3.4.7 – Photo du DummyFloor.**

- Thermocouples

Pour mesurer la température des robots, nous disposons de huit thermocouples répartis sur le dessus de huit *DummyWalker*. Ils sont soudés au boîtier de cuivre entourant chaque *DummyWalker*. Les thermocouples sont de type T permettant de lire des températures entre  $-250^{\circ}\text{C}$  et  $350^{\circ}\text{C}$  avec une résolution de  $0.5^{\circ}\text{C}$ . Ces thermocouples sont reliés à un boîtier SCXI-1000 de *National Instruments* (NI) dans lequel on retrouve une carte SCXI-1112 pour lire et enregistrer les données recueillies sur l'ordinateur du poste de travail.

Deux autres thermocouples de type T sont également placés à l'entrée et à la sortie du système. Cependant, ces thermocouples sont accessibles non pas par le boîtier de NI mais par le PLC du poste de travail.

- Programmes de contrôle

Comme mentionné précédemment, on contrôle le système à partir de l'ordinateur du poste de travail qui interface avec le PLC pour avoir accès au système. Ces programmes nous permettent de régler la température de référence et nous donne le choix entre trois différents modes de contrôle soit le relais, le PID ou le contrôleur marche/arrêt (*switch* ON/OFF). Parmi ces trois moyens de contrôle, seul le *switch* ON/OFF sera décrit ici car aucun autre contrôleur ne fût utilisé.



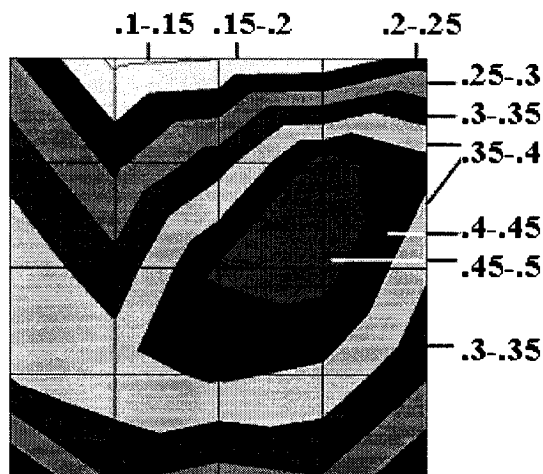
Un *switch* ON/OFF observe le signe de l'erreur entre la température de référence et la température actuelle. Tant que la température actuelle est supérieure à la température de référence, le *switch* ON/OFF ouvre la valve pneumatique jusqu'à une valeur fixée par l'utilisateur. Dans le cas contraire, il garde la valve fermée.

### **c) Problèmes de la configuration initiale**

A la suite de tests préliminaires effectués sur la configuration initiales quelques problèmes ont été identifiés :

- Pour commencer, le ventilateur de la souffleuse avait tendance à geler et arrêter de tourner. Ceci se produisait parce que le gaz frais, étant refroidi par de l'azote liquide a une température d'environ  $-195^{\circ}\text{C}$ , avait tendance à retomber dans le ventilateur. L'huile qui permettait à l'arbre du moteur de tourner ne pouvait pas être utilisée à des températures inférieures à  $-50^{\circ}\text{C}$ . Il fallait donc soit empêcher l'air frais de redescendre vers le moteur ou trouver une huile qui pouvait supporter des températures plus basses.

- Un autre problème était que le flux de gaz qui circulait dans le système était extrêmement turbulent. La figure 3.3.4.8 a été réalisée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud (Modèle FMA-900-V de OMEGA) placé à la verticale au dessus de la surface de travail. Des mesures moyennes de flux ont été prises en plusieurs points sur le *PowerFloor* et, par interpolation, le graphique a pu être réalisé.



**Figure 3.3.4.8 – Graphique représentant le flux de gaz (m/s) dans la configuration initiale.**

Le flux pénètre dans la chambre par la gauche et en sort par la droite. La figure montre que non seulement le flux était irrégulier mais qu'il pénètre en angle dans la chambre de refroidissement. Ceci avait comme effet de former un flux circulaire, apparent par la forme d'oeil au centre de la figure, et vraisemblablement des tourbillons à l'intérieur de la chambre. Cette forme de flux est indésirable pour plusieurs raisons. Premièrement, il cause beaucoup de turbulences. De plus, l'air chaud a tendance à rester emprisonné dans le haut de la chambre sans arriver à être effectivement évacué. Ceci cause une augmentation de la température du système qui est indésirable. Enfin, il est très difficile de caractériser ce type de système et d'en tirer des conclusions fiables.

- Des tests de refroidissement à 15W par robot ont révélé que le système n'avait pas la capacité de refroidir 1500W. Même avec la valve pneumatique complètement ouverte la température des robots continuait d'augmenter indéfiniment sans atteindre de plateau. Ceci a permis de montrer que l'échangeur de chaleur n'était pas assez puissant.

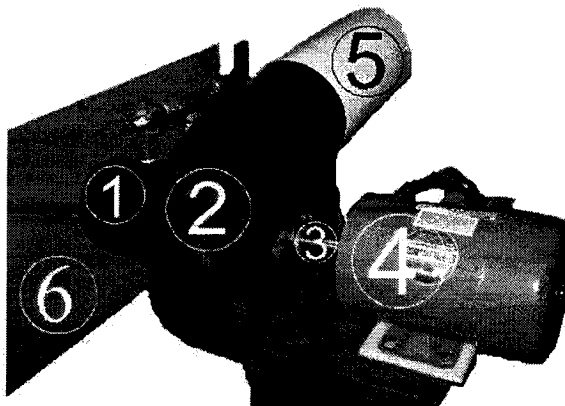
Tous ces problèmes étant identifiés, il fallait effectuer quelques changements à la chambre de refroidissement.

#### **d) Changements apportés**

Les modifications apportées à notre système de refroidissement sont résumées par les points suivants :

- Premièrement, le moteur a été placé sur un support à l'arrière de la chambre et au même niveau que le diffuseur à la sortie de la chambre. Tel que mentionné plus tôt, ceci permet de réduire les turbulences causées par le ventilateur dans le flux avant d'atteindre l'entrée de la chambre. Lorsque le flux parcourt les conduits, il s'homogénéise réduisant ainsi les turbulences. Placer le moteur à l'arrière et en aval de la chambre a aussi permis de régler le problème du ventilateur qui gelait. En effet, le gaz qui arrive au ventilateur sort de la chambre et est chaud d'avoir absorbé la chaleur qui s'y trouvait. Cette solution a fonctionné, le ventilateur n'a plus jamais gelé. Néanmoins, il est difficile de conclure si le flux est beaucoup moins turbulent avec ce changement.

Une attention particulière a été apportée au montage du moteur afin de réduire toute vibration que le moteur pourrait transmettre au système. Ceux-ci sont représentés sur la photographie suivante.

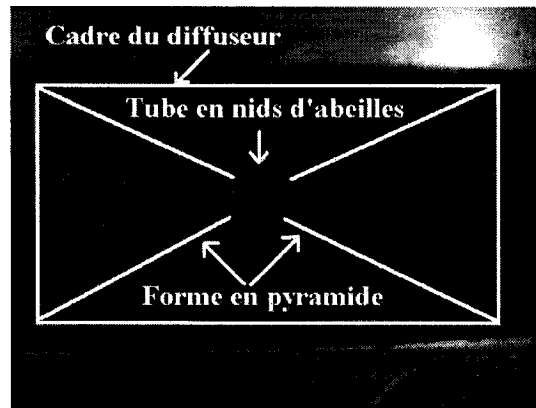


**Figure 3.3.4.9 – Photo de la souffleuse.**

Sur la figure 3.3.4.9, l'élément (3) représente l'arbre de transmission entre le moteur et le ventilateur. On remarque que le moteur est isolé du système car il repose sur une base indépendante au système. C'est seulement par l'arbre (3) que le moteur est lié au système. La partie (1) représente le conduit qui relie le ventilateur au diffuseur à la sortie de la chambre (6). Ce conduit est fabriqué d'une forme de ressort. En utilisant un conduit qui n'est pas rigide, on réduit aussi la transmission de vibrations. On remarque que le moteur aspire le gaz à l'extérieur de la chambre. Le ventilateur cause de nombreuses turbulences dans le flux, il est donc préférable d'éviter de le placer trop proche de l'entrée de la chambre en espérant que d'ici à ce que le gaz atteigne l'entrée il sera un peu moins turbulent. Enfin, la partie (5) représente le conduit qui relie la sortie du moteur jusqu'à l'entrée de l'échangeur.

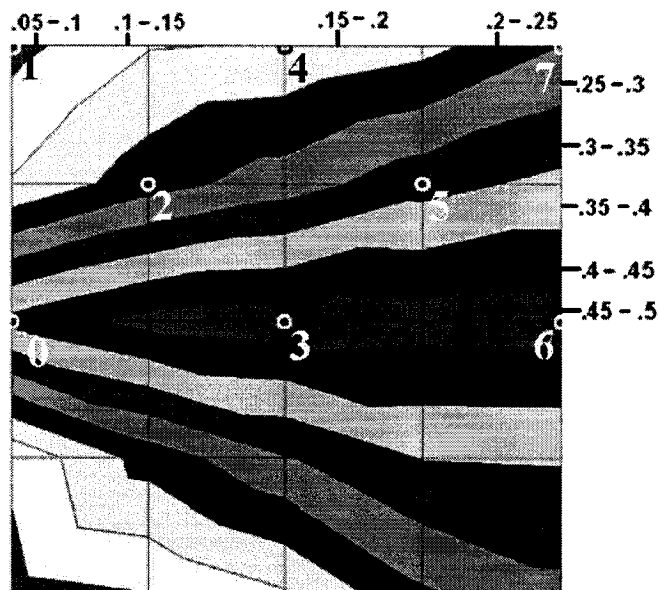
D'une part retirer le moteur du plancher aura empêché des vibrations provenant du sol d'affecter le système. Cependant, le fait d'avoir approché le moteur de la chambre et de les avoir reliés avec des composants non parfaitement flexibles auront sans doute empiré le couplage entre le moteur et la chambre. Il faudra alors soit rendre plus mou le conduit entre le moteur et la chambre ou bien il faut s'assurer que le système antivibration qui sera ajouté sous le PowerFloor arrive à faire disparaître ces vibrations.

- Sur la photo de la figure 3.3.4.10 du diffuseur à l'entrée de la chambre, on observe une structure à nids d'abeilles ('honeycomb') qui a été ajoutée. Cette structure permet de réduire les turbulences dans le gaz qui entre dans la chambre. Ces photos ont été prises à l'intérieur du volume principal et montrent la forme en cône des diffuseurs.



**Figure 3.3.4.10 – Photo de l'intérieur du diffuseur à l'entrée de l'enceinte.**

Le flux circulaire, observé auparavant (figure 3.3.4.8), a disparu grâce à l'ajout du tube en nids d'abeille dans le diffuseur à l'entrée de la chambre. Cet ajout a également permis de rediriger le flux vers le centre de la chambre et d'obtenir un flux symétrique par rapport à l'axe central et en forme d'éventail tel que présenté sur la figure 3.3.4.11. Idéalement, le flux recherché devrait être uniforme (vitesse constante sur toute la surface) afin de refroidir uniformément la flotte de robots. Cependant, ceci aurait requis des changements majeurs tel que allonger le diffuseur et élargir sa sortie afin d'épouser la largeur de la chambre. Les chiffres sur la figure représentent la position des thermocouples qu'on utilise lors de nos tests.



**Figure 3.3.4.11 – Graphique du flux (m/s) dans la configuration améliorée.**

Le flux est très fort sur l'axe central mais dans les coins à gauche de la figure, il est presque inexistant. Cette caractérisation est importante pour l'analyse des résultats de tests thermiques ultérieurs.

- Pour augmenter la capacité de refroidissement de notre système, un échangeur a été rajouté à la configuration précédente. Il consiste en un tuyau de cuivre à l'intérieur du conduit à l'arrière de la chambre. Ce tube parcourt un peu plus de 2 m du conduit. L'azote liquide qui quitte le premier échangeur circule ensuite dans ce tuyau. Ceci nous permet de récupérer presque toute la capacité de refroidissement de l'azote liquide. Il est important de souligner ici que l'azote n'est pas injecté à l'intérieur de la chambre de refroidissement. Quant au gaz qui circule dans le système il est également isolé de l'extérieur.

Les photos 3.3.4.12 montre la configuration actuelle de la chambre de refroidissement après les modifications. On peut y voir, l'intérieur de la chambre (8), les diffuseurs (3) à l'entrée et la sortie de la chambre, le volume principal sur sa table anti-

vibration (5), la souffeuse (1) sur son support indépendant, l'échangeur de chaleur (2), la valve qui contrôle le flux (7) ainsi que le poste de contrôle (6).

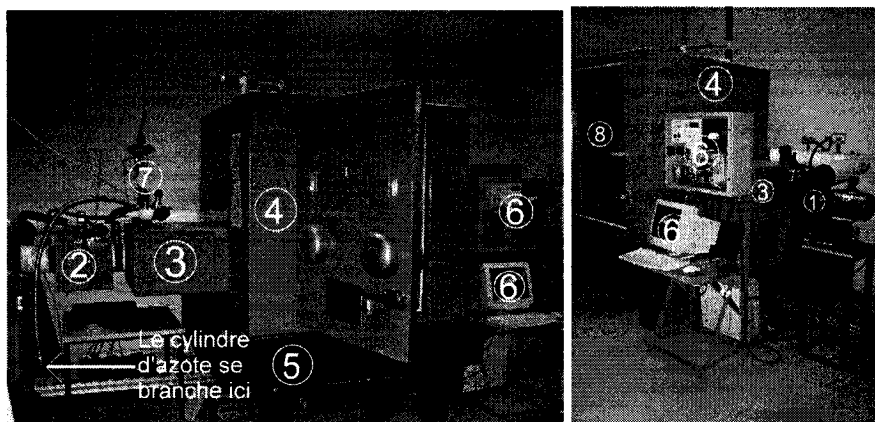


Figure 3.3.4.12 – Photo de la configuration amélioré du système de refroidissement.

Dans cette configuration, le gaz sorti de la souffeuse, circule dans le conduit et commence à être refroidi en atteignant la limite du tube tyroïde. À cet endroit, le gaz est à son plus chaud et ne fait que devenir de plus en plus froid le long du conduit. Le flux est donc déjà en grande partie refroidi et ceci avant même d'être entré dans l'échangeur.

Le système peut maintenant être schématisé par la figure 3.3.4.13.

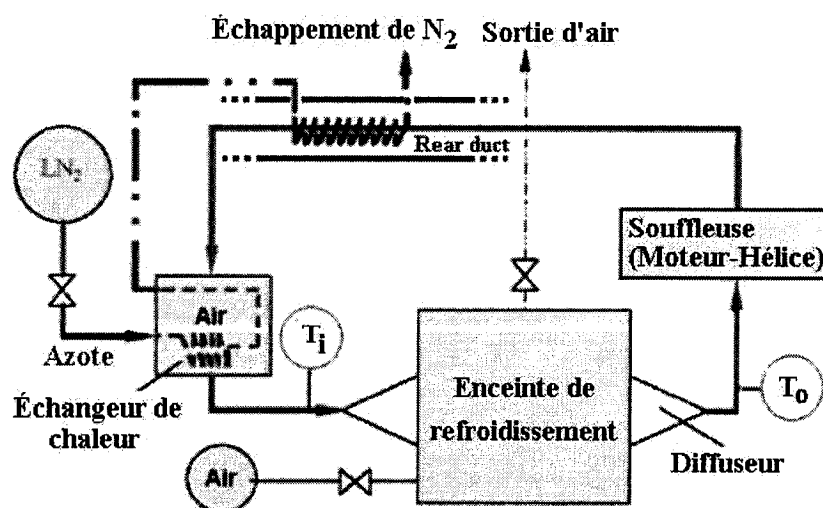


Figure 3.3.4.13 – Représentation du fonctionnement du système actuel.

À l'aide de tests préliminaires effectués avec notre configuration améliorée nous nous sommes assuré que la capacité de refroidissement permettait d'évacuer plus de 2000W. Il est donc possible de refroidir 100 robots qui dissipent plus de 20W chacun. Dans la pratique, nous n'avons pas dépassé 15W car les températures d'équilibre se situent au-delà de la limite de 70°C. Cette nouvelle configuration nous a permis alors d'analyser le comportement thermique d'une flotte de robot pour différentes puissances et pour différentes dispositions.

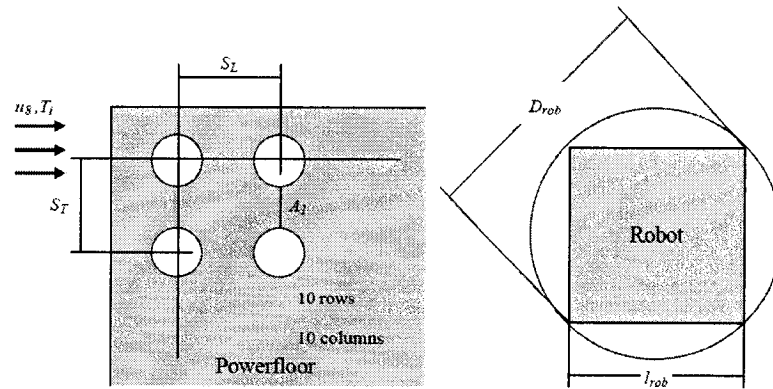


## IV. EXPÉRIMENTATION

Dans ce chapitre, il sera étudié le comportement de la chambre de refroidissement ainsi que ses limites. Par souci de repousser les limites de la chambre et aussi de savoir quelle influence aura la modification d'un paramètre sur le comportement de la chambre, plusieurs expériences ont été réalisées. Mais avant de passer aux l'expériences, un modèle théorique de base sera présenté.

### A. Modèle théorique

Plusieurs modèles théoriques ont été développés dans le laboratoire. Un premier modèle [Schindler 2002] fut élaboré lors de la conception de la chambre, où les robots sont représentés par des cylindres répartis symétriquement sur la surface de travail. La figure 4.1.1 représente cet agencement.

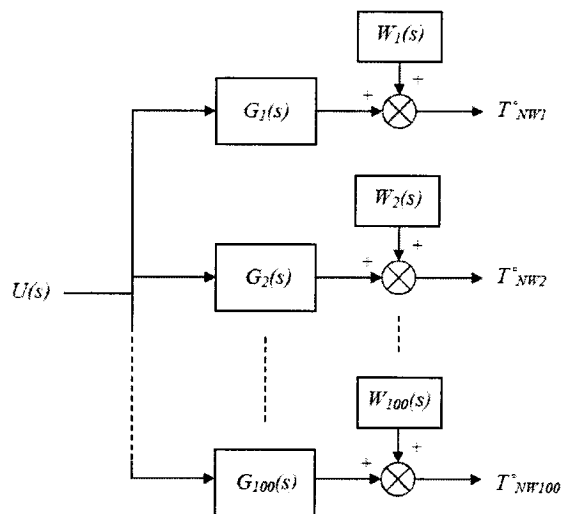


**Figure 4.1.1 – Modèle initiale des robots sur la surface de travail.**

Ce modèle a permis de déterminer si par convection forcée il serait possible de refroidir la flotte de robot. Les calculs effectués ont montré que pour un flux laminaire d'hélium de 0.5m/s avec une température de -50°C, la chambre de refroidissement arrive à absorber 1500W de chaleur dissipée par les robots, soit 15W par robot. Il a aussi été calculé que l'écart de température entre l'entrée de la chambre et la sortie de la chambre

serait de 15°C. Cependant, le modèle supposait que le flux dans la chambre était laminaire et les calculs étaient effectués en régime permanent où tous les robots dégagent la même quantité de chaleur. On ne peut donc pas prévoir le comportement du système lors d'un changement de puissance. Enfin, il supposait que les écarts de température entre les robots ne dépasseraient pas celui entre la température à l'entrée et à la sortie de la chambre. Ce qui, par les premiers tests, s'est révélé malheureusement trop éloigné de notre réalité.

Comme il est très difficile d'établir les équations différentielles qui régissent le système dû au grand nombre de variables du système, un second modèle (figure 4.1.2) empirique a été développé [Macicior 2004].

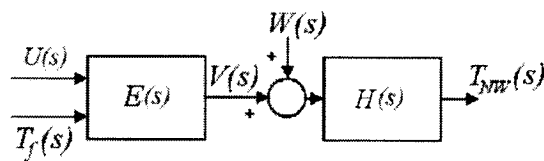


**Figure 4.1.2 – Modèle empirique du système.**

Où  $U(s)$  représente l'ouverture de la valve. Les  $G_i(s)$  pour  $i$  allant de 1 à 100 sont les systèmes qui représentent la relation entre l'ouverture de la valve et la température des robots. Les  $W_i(s)$  pour  $i$  allant de 1 à 100 représentent des perturbations.  $T^o_{NW_i}$  pour  $i$  allant de 1 à 100 représente la température du robot. Dans ce modèle, on considère que le contrôle de la température des robots se fait directement avec la valve. Compte tenu

de la grande distance séparant la valve des robots et de la précision avec laquelle on veut contrôler leur température ce modèle pourrait être amélioré en subdivisant le problème.

En effet initialement, il était prévu de contrôler la température de la chambre de refroidissement pour contrôler la température des robots. Le problème était que le comportement thermique des robots était différent de celui de la chambre. On a alors décidé de contrôler la température des robots directement. Prise séparément, Les deux approches n'ont pas atteint nos exigences. Une combinaison des deux approches a alors été considérée pour la présente étude. Pour se faire, on peut représenter le système à l'aide de deux fonctions (figure 4.1.3), la première exprimant la relation entre la valve et la température du flux et la seconde la relation entre le flux et la température des robots.



**Figure 4.1.3 – Modèle qui divise le système en deux.**

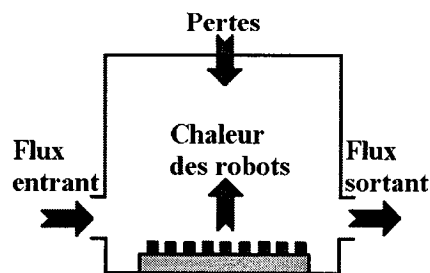
Où les nouvelles variables  $V(s)$  et  $T_f(s)$  représentent respectivement la température du flux et celle à l'entrée de l'échangeur.  $E(s)$  représente la relation entre la température du flux et la valve.  $W(s)$  est une perturbation.  $H(s)$  est la relation entre le flux et la température des robots.  $H(s)$  est similaire à la fonction  $G(s)$  dans le schéma 4.1.2 mais avec  $V(s)$  comme variable d'entrée.  $T_{NW}(s)$  est la moyenne des températures des robots.

Étant donné qu'il n'y a qu'une seule variable de contrôle dans le système, la valve, la température moyenne des robots est utilisée pour contrôler cette commande. Cette variable doit contrôler un ensemble de sous-systèmes que sont les robots.

Il y a lieu de préciser quelques points. Si deux robots sont relativement proches, ils vont échanger de la chaleur mais on n'a pas tenu compte du couplage thermique possible entre les sous-systèmes. On peut les traiter comme des perturbations.

Lorsqu'on atteint la température de fonctionnement du système, ceci signifie qu'on a refroidi les murs, le plancher, le plafond et le volume de gaz à l'intérieur de la chambre. Les robots prennent moins de temps que la chambre pour atteindre un régime permanent mais leur température va continuer à changer tant que la température de la chambre ne sera pas stable.

Lorsque les robots changent de puissance, le flux va changer de température et la chambre va s'adapter à ce nouveau flux ce qui allonge le temps pour atteindre un régime permanent. L'isolation imparfaite de la chambre crée une perturbation. Il y a un jeu d'équilibre entre les différentes sources d'énergie dans la chambre. Celles-ci peuvent être représentées à la figure 4.1.4.



**Figure 4.1.4 – Échanges de chaleur entre la chambre et l'extérieur.**

Ces équilibres seront analysés lors des tests sur la chambre de refroidissement.

Pour ce type de système qui est un processus thermique, une approximation du premier ordre est souvent suffisante. Les fonctions de transfert des systèmes considérés seront de la forme:

$$S(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{T_s} \quad (4.1.1)$$

Où  $K$  est le gain en régime permanent,  $\tau$  est la constante de temps du système soit le temps que le système prend pour atteindre 68% de son gain en régime permanent. On doit aussi ajouter en petit retard dans le système qui est représenté par l'exponentielle, c'est  $T$  qui représente le retard. Cette approximation du premier ordre devrait être suffisante pour compléter les fonctions  $E(s)$  et  $H(s)$ .

Ce modèle devrait être validé par une batterie de tests qui nous permettront la caractérisation du comportement complexe de notre système.

## ***B. Amélioration du comportement***

Dans ce qui suit, il est présenté des expériences effectuées pour étudier le comportement du système et caractériser le refroidissement d'une flotte de 100 robots.

### **1. Tests à l'air**

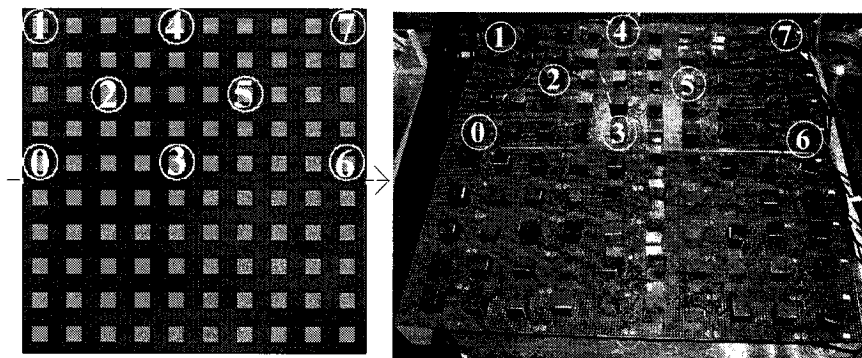
Suite aux travaux effectués précédemment sur la chambre de refroidissement, on constata qu'il y avait trop d'oscillations en régime permanent et que la différence de température était toujours trop élevée lors des tests à 10W par robot [Macicior 2004].

Tel que mentionné, précédemment c'est la température moyenne des robots qui a été contrôlée pour les tests en question. Pour réduire les oscillations de température des robots, on a choisi de contrôler la température à la sortie de la chambre. Ce choix a été fait lorsqu'on a remarqué que la température de l'enceinte était directement liée à celle des robots.

Ces modifications permettront ultérieurement de subdiviser le système conformément à notre modèle. Au lieu de contrôler directement la température moyenne

des robots, on va contrôler la température à la sortie de la chambre. Dans le futur, on pourra ajuster cette température en fonction de la température moyenne des robots.

Pour les tests, les thermocouples ont été positionnés selon la figure 4.2.1.1. La flèche représente le flux qui passe au dessus du plancher de la gauche vers la droite.



**Figure 4.2.1.1 – Représentation et photographie des thermocouples lors des tests.**

Étant donné que le flux est symétrique par rapport à l'axe central, il n'est pas nécessaire d'étudier toute la surface du plancher. Pour cette raison, les thermocouples ont été placés uniquement sur une moitié du plancher. Ceci permet par la même occasion d'augmenter la densité de thermocouples sur la surface étudiée et par conséquent le nombre d'informations recueillies par densité de surface.

L'objectif de ce test est d'observer le comportement global de notre flotte a des changements de puissance importants. Le protocole expérimental utilisé comprend plusieurs étapes présentées ci-dessous.

- Étape 1 : Refroidissement de la chambre

Avant toute intervention des *DummyWalker*, nous commençons par baisser la température de la chambre en la contrôlant par le thermocouple à sa sortie. Lors de cette étape on passe de la température ambiante jusqu'à une température de référence typiquement en bas de 0°C. Cette étape permet non seulement à la chambre de

refroidissement d'atteindre la température de référence mais de refroidir les murs, le plafond et le plancher de la chambre.

- Étape 2 : Allumage du *DummyFloor* à 10W par robot

On continue de contrôler la température à la sortie de la chambre à une température de référence mais on allume le *DummyFloor* pour que chaque *DummyWalker* génère une puissance de 10W. Pour ce faire, on allume le générateur de puissance qui est relié au *DummyFloor*. Pour un test à 10W par robot par exemple, on veut que le générateur produise 1000W pour les 100 robots.

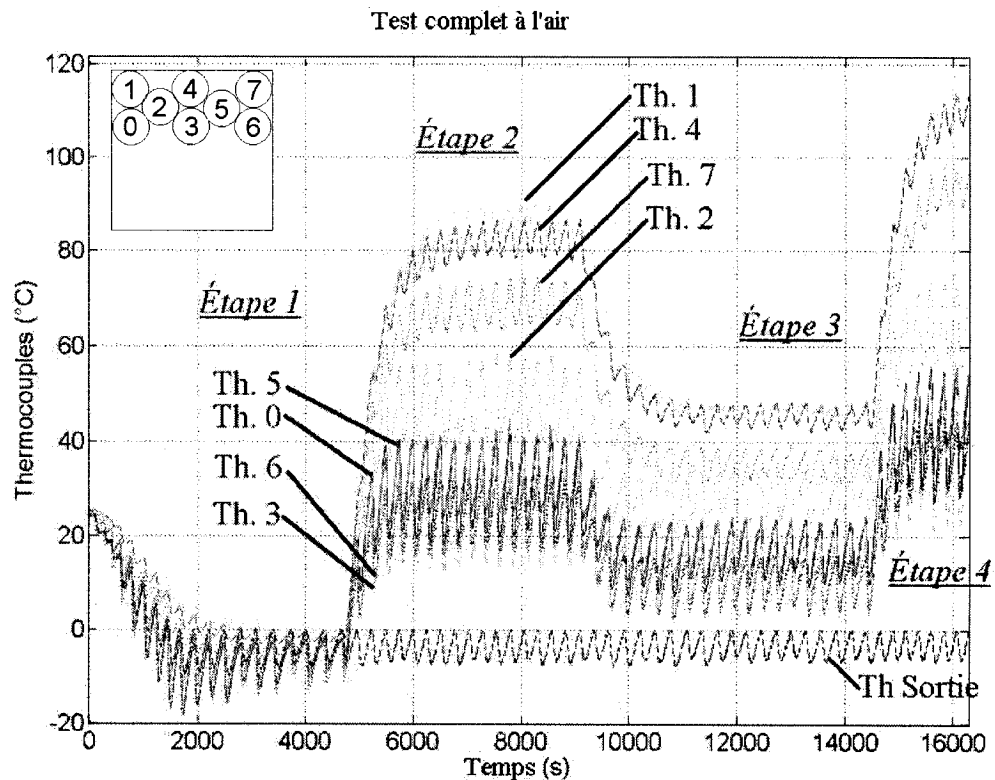
- Étape 3 : Réduction de puissance du *DummyFloor* à 5W par robot

Durant cette étape, on réduit de moitié la puissance générée par les *DummyWalkers*.

- Étape 4 : Augmentation de la puissance à 15W par robot

A ce stade, on triple la puissance générée par les *DummyWalkers*.

Tous les tests ont été effectués à la même vitesse de rotation du moteur de la souffleuse, pour garantir un débit semblable pour tous les tests. Les résultats du premier test effectué avec la nouvelle configuration sont présentés à la figure 4.2.1.2. Ce test a été fait avec de l'air comme médium et donne les lectures dynamiques de la température aux divers thermocouples.



**Figure 4.2.1.2 – Test utilisant l'air.**

Ce test est révélateur. On dépasse déjà les limites de température à 10W. Le thermocouple 1 atteint les 90°C tandis que le thermocouple 3 est légèrement au dessus du 10°C. La différence de température est plus de 70°C.

Dans notre test, nous constatons que les thermocouples compris dans des régions avec des débits d'environ 0.3 m/s sont similaires en température. Par contre, certains de nos thermocouples sont placés dans des régions à très faible débit et on remarque que ce sont eux les plus chauds soit les thermocouples 1, 4, 7 et 2. On observe que les thermocouples 0, 3, 5 et 6 dans la figure 4.2.1.2 sont à 30°C d'écart entre eux et qu'ils sont tous balayés à une vitesse d'au moins 0.3m/s.



Lors de l'étape 3, on remarque le même phénomène qui se répète. Pour l'étape 4, nous avons atteint le seuil critique de 120°C donc il a fallu arrêter le test. Mais au moment d'arrêter le test, les thermocouples 0, 3, 5 et 6 étaient à moins de 40°C d'écart, qui est tout à fait à l'intérieur des limites de fonctionnement. Une extrapolation grossière semble indiquer qu'en diminuant d'environ 20°C la température de référence à la sortie de la chambre aucun robot ne dépasserait les 120°C.

Le graphique 4.2.1.3 illustre la relation entre les température des thermocouples et la vitesse de l'écoulement à leur position respectives telle qu'établie sur la figure 3.3.4.11. L'importance de la vitesse de flux sur le refroidissement du robot est évidente sur ce graphique plus la vitesse augmente, plus la température baisse. Par contre, on observe aussi que la température a tendance à diminuer moins rapidement lorsqu'on se déplace vers la sortie de la chambre étant donné que la température du flux augmente en parcourant le plancher.

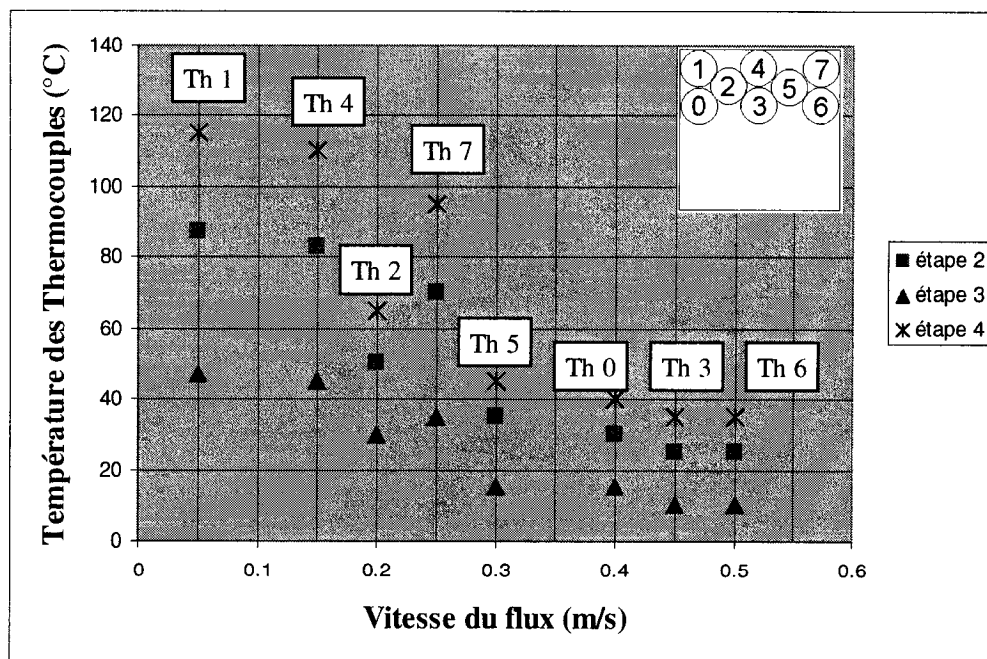


Figure 4.2.1.3 – Température selon la vitesse du flux.

En effectuant ce test, on a observé la présence d'oscillations importantes de températures en régime permanent nuisibles à la performance générale du robot.

## 2. Utilisation de l'hélium comme médium de refroidissement

La chambre a été conçue pour fonctionner à l'hélium, l'hélium avait été choisi pour son coefficient d'échange de chaleur très élevé, le meilleur après celui de l'hydrogène. L'hydrogène fût écarté comme gaz de refroidissement essentiellement à cause de sa nature explosive. Les résultats suivants ont été obtenus dans un test où la concentration en hélium fût maintenue à plus de 90%.

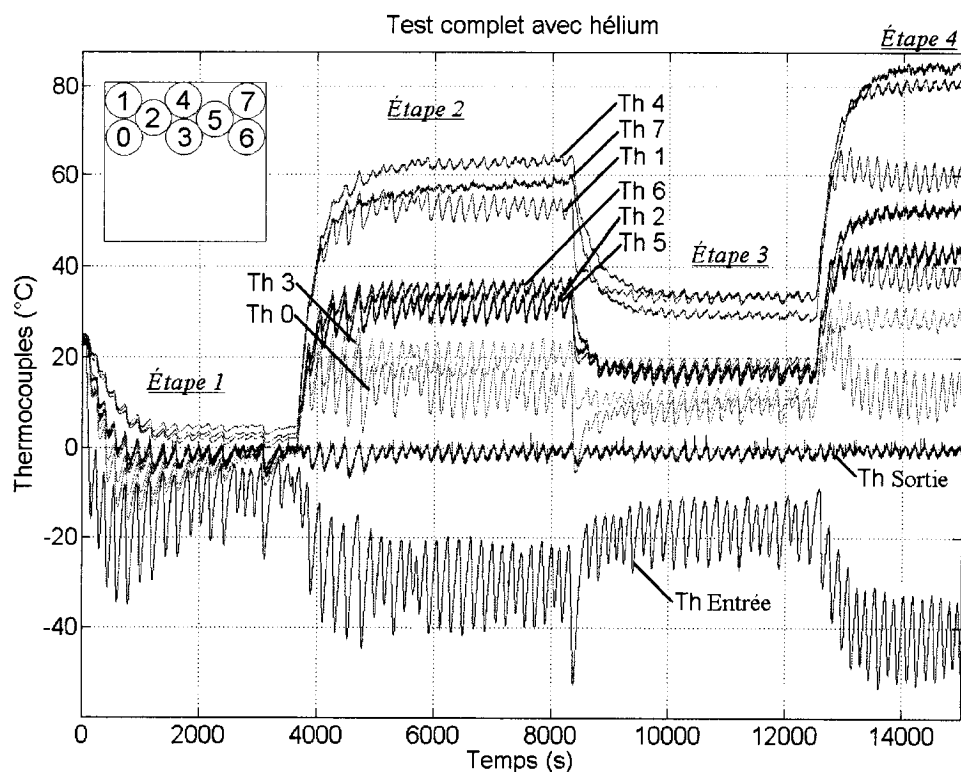


Figure 4.2.2.1 – Test utilisant l'hélium.

Ce test confirme qu'il y a une différence importante selon qu'on utilise de l'air ou de l'hélium pour refroidir le système. Pour le test de l'air, on dépassait déjà les

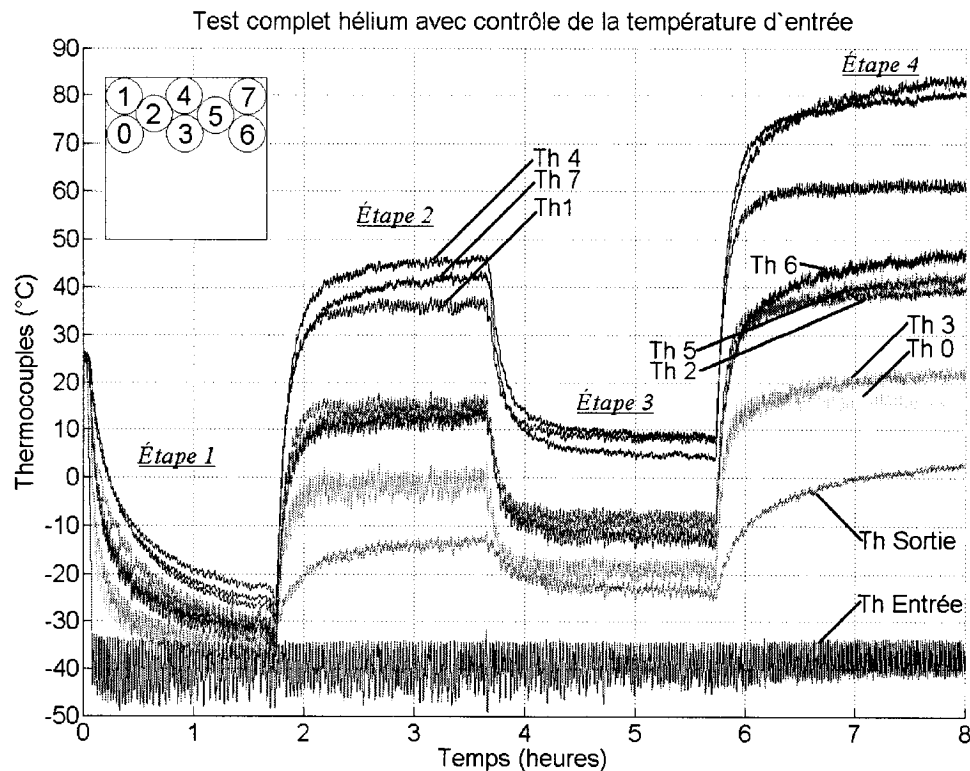
limites de fonctionnement à 10W. Ce n'est pas le cas pour l'hélium pour lequel on a une différence de température de 60°C. Par contre, pour l'étape à 15W, on dépasse le 70°C d'écart d'environ 10°C. On remarque que si on arrivait à faire disparaître les oscillations en régime permanent, on serait très proche du 70°C de différence. Ces oscillations proviennent de la variation importante de la température du flux lorsque la valve pneumatique du système est ouverte ou fermée. La courbe de la température à l'entrée du système a été ajoutée pour montrer à quel point elle fluctue. Il est possible de croire que si on arrivait à réduire les oscillations de la température à l'entrée du système, il y aurait moins d'oscillations à l'intérieur du système. Par contre, on remarque que lorsqu'on contrôle la température à la sortie de la chambre autour de 0°C, les thermocouples respectent tous les températures de fonctionnement à 5W et 10W, ceci pourrait s'avérer important lors du choix de l'architecture de contrôle.

Lors du test, on remarque que le classement des thermocouples par température croissante varie d'une étape à l'autre. Ceci semble vouloir dire que l'écoulement change de forme à l'intérieur de la chambre lorsqu'on modifie la puissance que génère le *DummyFloor*.

Par ailleurs, on remarque que lorsqu'on s'éloigne de l'entrée de la chambre, la température a tendance à augmenter. Ceci est surtout le cas pour l'étape 4 lorsqu'on observe les thermocouples 0, 3 et 6 sur la ligne du centre mais aussi les thermocouples 1, 4 et 7.

### **3. Contrôle de la température à l'entrée de la chambre**

Pour étudier ce qu'on vient de mentionner sur la température à l'entrée qui oscille trop, on a choisi de contrôler la température à l'entrée de la chambre au lieu de la température à la sortie de la chambre. La figure 4.2.3.1 montre nos résultats pour une température de référence à l'entrée de -40°C.



**Figure 4.2.3.1 – Test utilisant l'hélium mais avec contrôle de l'entrée.**

On remarque que les oscillations sont beaucoup moins importantes par contre il reste des variations thermiques qui s'apparentent d'avantage à du bruit thermique. Les thermocouples qui continuent de fluctuer sont ceux qui sont les plus proches de l'entrée de la chambre et qui sont exposés à un flux élevé soit les thermocouples 0 et 3. Avec la réduction des oscillations, on remarque que pour le test à 15W, les thermocouples affichent des températures qui sont à l'intérieur des limites de fonctionnement. Le thermocouple le plus chaud affiche 85°C tandis que le plus froid affiche 15°C soit une différence de 70°C. Un problème survient lorsqu'on contrôle la température à l'entrée de la chambre. Les thermocouples les plus éloignés de l'entrée prennent très longtemps pour atteindre le régime permanent. Une seule explication possible est que la température des thermocouples n'est pas stable parce que lorsqu'on contrôle la

température à l'entrée de la chambre, on ne contrôle pas tout à fait la température de l'enceinte qui suit l'entrée. Ceci n'est pas le cas lorsqu'on contrôle la température à la sortie. Ce phénomène est problématique car même après deux heures le système n'a toujours pas atteint l'équilibre. Pour le test précédent, cela prenait moins d'une heure.

On remarque encore dans ce test que le classement des thermocouples selon leur température varie d'une étape à l'autre. Il y a sans doute des modifications de flux à l'intérieur de la chambre d'une étape à l'autre selon la puissance dégagée par le *DummyFloor*.

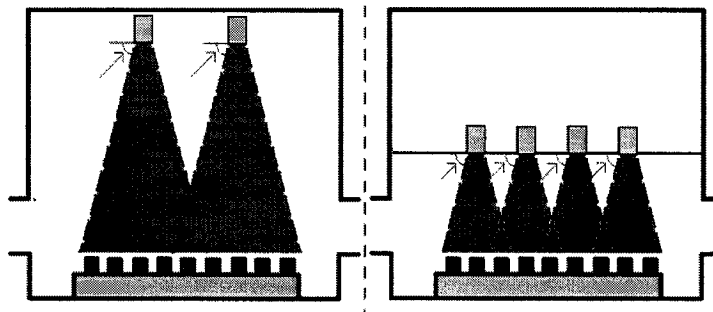
Les oscillations étant moindres, le contrôle de la température à l'entrée de la chambre sera retenu pour les tests suivants.

#### **4. Réduction du volume de la chambre**

Vu le temps que cela prend pour atteindre l'équilibre, une plaque de plexiglass fût ajoutée à l'intérieur de la chambre pour réduire son volume de moitié. Avec un volume moindre, on espérait arriver à diminuer le temps de réaction du système.

La plaque de plexiglass est le seul changement physique qu'on a apporté à la chambre depuis les modifications physiques de la chambre mentionnées au chapitre 3, section A, 4, d. L'ajout d'une plaque de plexiglass cause quelques problèmes si on décide de la conserver. Le système de communication et le système de positionnement fonctionnent dans l'infrarouge mais l'infrarouge ne peut traverser le plexiglass. Si il est jugé nécessaire d'utiliser la plaque, il faudrait alors soit ajouter une fenêtre infrarouge dans la plaque de plexiglass. Une fenêtre infrarouge est une lentille constituée d'une matière par lequel peut traverser l'infrarouge comme un polymère pour infrarouge ou même le germanium. Ces deux types de matériaux n'ont pas le même pourcentage de transmission de l'infrarouge. Même avec les meilleures fenêtres infrarouges, on perd

10% de transmission. Ceci peut affecter la résolution du positionnement. Une autre solution est d'abaisser les deux systèmes et de percer des trous dans le plexiglass pour laisser passer les lentilles des systèmes. Le problème est qu'il faudra augmenter le nombre d'instruments de communication et de positionnement pour pouvoir analyser toute la surface de travail.



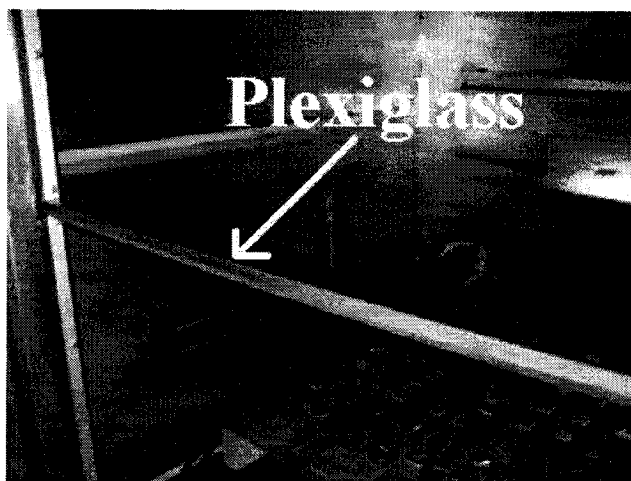
**Figure 4.2.4.1 – Zone de travail étudiée selon la hauteur des instruments.**

La figure 4.2.4.1 illustre ce besoin. L'angle d'ouverture des lentilles de ces systèmes étant limité, lorsqu'on diminue la hauteur à laquelle on place les appareils, on ne peut pas couvrir toute la surface de travail sans ajouter d'autres appareils.

Un avantage certain d'avoir la plaque de plexiglass est que le système est coupé en deux. Au-dessus de la plaque, on peut placer nos systèmes de positionnements et de communications. Ces systèmes ont généralement les mêmes limites de température de fonctionnement. Dans le système sans plaque de plexiglass, il faudra absolument construire un boîtier dans lequel on placera ces systèmes et qu'on maintiendra à température constante à l'intérieur de la plage de fonctionnement des appareils à l'aide d'une source de chaleur. Dans la configuration avec la plaque, le boîtier n'est pas nécessaire mais l'élément chauffant le sera. Un autre avantage est que les lentilles des appareils peuvent être sensibles à l'écart de température entre l'intérieur de l'appareil et la température de la chambre. Si c'est le cas, la précision des appareils peut être affectée. Dans la configuration avec la plaque et la fenêtre infrarouge, les lentilles ne sont pas affectées par un écart de température.

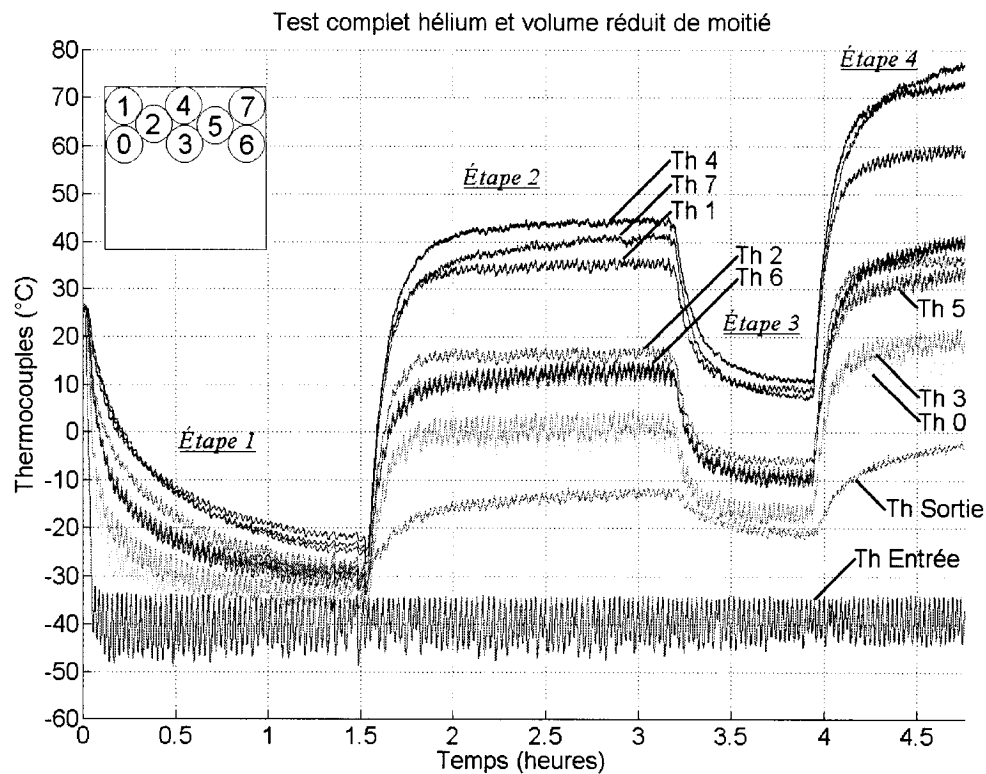
L'avantage le plus important de réduire le volume de la chambre est qu'il nécessite moins d'azote liquide pour assurer le fonctionnement de la chambre. Il est désiré de superposer des surfaces de travail une au dessus de l'autre. Pour ce faire, il faudrait savoir si la réduction du volume au-dessus de la surface de travail va affecter le refroidissement des robots, la chaleur dégagée par les robots n'ayant pas autant de volume à occuper au-dessus de la surface de travail. Il est possible de croire que cette accumulation de chaleur excédentaire pourrait diminuer l'efficacité du système de refroidissement.

La photo sur la figure 4.2.4.2 montre la plaque qu'on a placée à l'intérieur de la chambre. Elle est placée à mi-hauteur de la chambre. On a scellé les contours de la plaque pour isoler soigneusement le volume étudié.



**Figure 4.2.4.2 – Couche de plexiglass placée à mi-hauteur de la chambre.**

La figure 4.2.4.3 représente le test qu'on a fait. On continue d'utiliser de l'hélium comme gaz de refroidissement.



**Figure 4.2.4.3 – Test utilisant l’hélium mais avec le volume réduit.**

Les résultats sont surprenants, il n’y a pas de différences significatives entre les tests avec et sans la plaque de plexiglass pour les tests à 5W et 10W. On remarque que les délais pour atteindre la stabilité du système restent importants sans réduction notable. Par contre, pour le test de 15W, on remarque une petite baisse de température mais pas suffisante pour être attribuable seulement à l’effet de la plaque de plexiglass qui pourrait être attribuable à la puissance générée par le générateur de puissance qui était légèrement différente entre les deux tests. Ceci signifie que l’ajout de la plaque de plexiglass aura eu peu d’influence sur la capacité de refroidissement du système. On peut l’expliquer en considérant que la chambre était au départ très surdimensionnée et que les échanges de chaleur s’effectuaient dans le voisinage proche des robots.



La raison pour laquelle la chambre prend autant de temps pour atteindre la stabilité thermique n'est donc pas due au temps pour refroidir le gaz à l'intérieur de la chambre mais plutôt à son isolation qui n'est pas parfaite.

Ces résultats sont intéressants lorsqu'on désire superposer les surfaces de travail, la chaleur excédentaire qui s'accumule au dessus de la surface de travail n'aura eu aucune influence sur le refroidissement des robots. Il n'y a donc aucune raison de croire qu'il ne serait pas possible d'ajouter une autre surface au dessus de la première avec son propre système de convection forcée.

On croit avoir atteint les limites du système pour l'hélium avec un contrôleur *ON/OFF*. On a montré que pour ce type de contrôle, on a la présence d'oscillations thermiques de l'ordre de 10°C et une puissance maximum de fonctionnement de 15W par robot. Cependant, pour certains robots les résultats dénotent que nous sommes trop proches des limites thermiques.

## **5. Utilisation d'un PID automatique**

À ce stade, la priorité est de diminuer le bruit thermique en régime permanent car il est jugé qu'il ne sera pas possible d'améliorer les limites de puissance de fonctionnement du robot. Lors du dernier test, on remarquait toujours certains thermocouples dont la température affichée oscillait de 10°C. Il est possible de croire qu'avec un meilleur contrôleur, on pourrait améliorer ces résultats. Cryotronix a mis à notre disposition un contrôleur PID (contrôleur proportionnel, intégral et dérivé) automatique pour nous aider à contrôler la température du système. Notre programme de contrôle a aussi un PID comme contrôleur disponible. Par contre, il peut être très long et coûteux en gaz de déterminer les meilleurs paramètres du PID par expérimentation. Le PID automatique, à partir d'une routine et d'un algorithme, peut faire une approximation du premier ordre du système montré plus tôt. Le contrôleur peut alors déterminer les

meilleurs gains pour contrôler le système. Ce type de dispositif est couramment utilisé dans l'industrie pour contrôler des systèmes de refroidissement. Notre contrôleur PID automatique est un OMRON E5CK.

On l'utilise donc pour contrôler la température à l'entrée de la chambre. Il détermine par approximation un système de premier ordre entre le thermocouple à l'entrée de la chambre et l'ouverture de la valve pneumatique à laquelle il accède à travers le PLC (de l'acronyme anglais Programmable Logic Controller pour automate programmable industriel).

Un contrôleur PID est plus complexe qu'un contrôleur *ON/OFF*. Le contrôleur PID utilise l'erreur entre la température actuelle et la température de référence pour déterminer l'ouverture de valve appropriée qu'on nomme la commande.

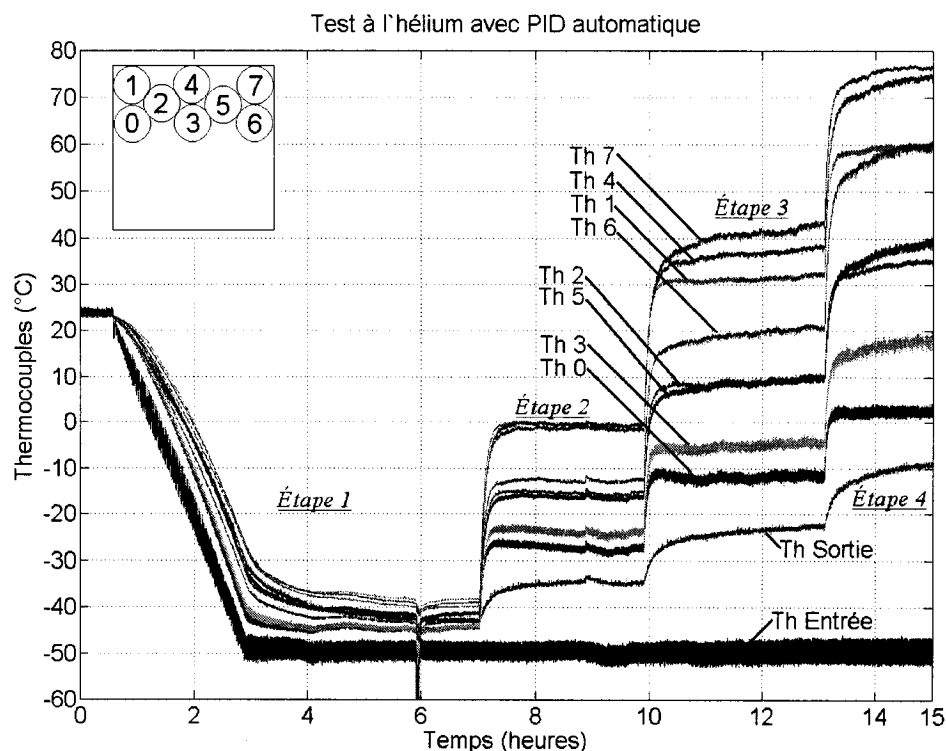
L'équation suivante représente le calcul effectué par le contrôleur.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) \quad (4.2.5.1)$$

Dans notre cas, l'erreur  $e(t)$  représente la différence de température entre la température à l'entrée de la chambre et la température de référence.  $t_0$  représente le temps de départ. Les  $K_i$  sont les gains du contrôleur.

Pour ce test, mentionnons cependant que le protocole expérimental a été modifié. Lors de l'étape 1, au lieu de passer brusquement de la température ambiante à la température de référence de  $-50^\circ\text{C}$ , on baisse graduellement la température de deux degré Celsius par minute, ceci donne le temps au système de se refroidir lentement. De plus, on a inversé les étapes 2 et 3 du test pour augmenter la puissance d'étape en étape. On commence à 5W à l'étape 2, on augmente à 10W à l'étape 3 et enfin à 15W à l'étape 4.

Le test de la figure 4.2.5.1 montre les résultats obtenus.



**Figure 4.2.5.1 – Test à l'hélium avec le PID automatique.**

On observe la descente graduelle de température du système dans l'étape 1. La température commence à descendre lorsque la température de référence passe sous la température ambiante. On observe une chute de température autour de 6 heures. C'est à cet instant qu'on a déclenché la routine d'ajustement automatique des paramètres du PID. On remarque aussi une petite montée de température autour de 9 heures, quand la bonbonne d'azote liquide a dû être remplacée.

La durée de chaque étape a été allongée pour essayer d'atteindre la stabilité de la température à la sortie de la chambre. Malgré cela, même après deux heures, au cours de l'étape trois la température à la sortie n'est toujours pas stable. On pourrait essayer le

même test mais en contrôlant la température à la sortie de la pièce mais tout laisse croire qu'au lieu d'être la température à la sortie qui ne se stabilise pas ce serait celle à l'entrée de la chambre. De plus, on augmenterait la grosseur du bruit thermique sur les robots si on contrôle la température à la sortie de la pièce.

On notera que, même si les températures dans ce test sont de 10°C plus froides par suite de l'abaissement de la température de référence qui est passé de -40°C à -50°C, les différences de température de ce test sont cependant comparables à celles du test précédent. On observe aussi que le classement des thermocouples est différent du précédent. Ceci peut être dû au changement de *DummyFloor*.

On observe que les oscillations de températures n'ont jamais été aussi faibles soit à peine plus de 5°C. Il est très difficile de croire qu'on pourra réduire ces oscillations d'avantage avec l'équipement actuel. En effet, s'il était possible de garder l'ouverture de la valve pneumatique constante, on pourrait faire disparaître ces oscillations mais il semble que dès que l'azote liquide pénètre dans l'échangeur de chaleur la variation de température est trop importante pour garder la valve ouverte.

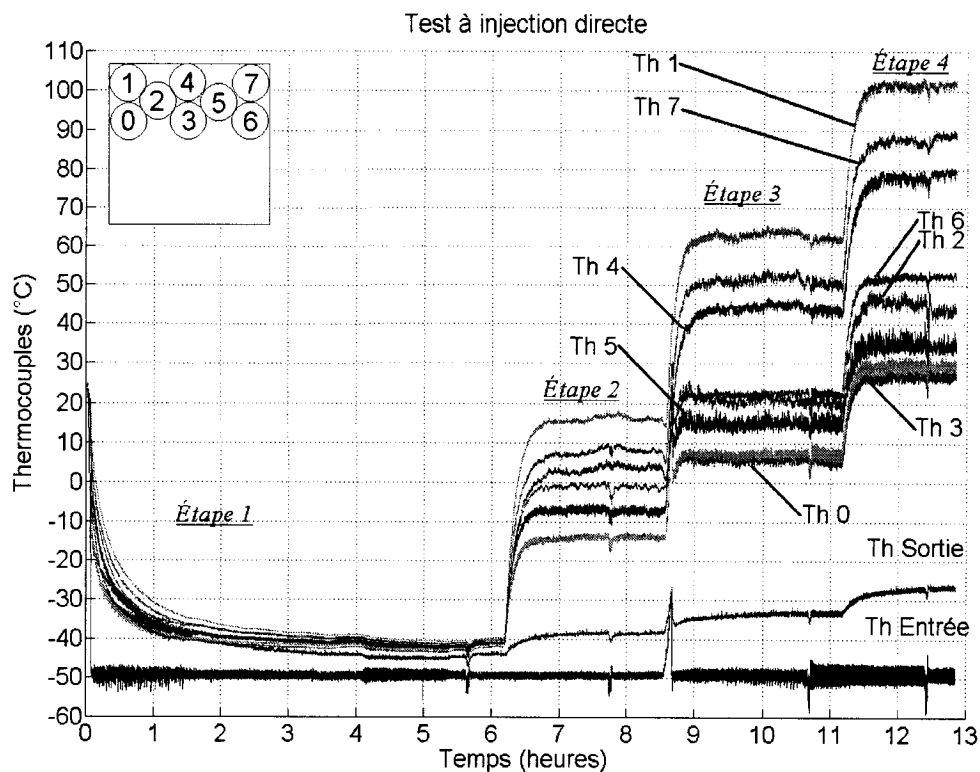
L'ouverture pourrait être améliorée mais il y aura la présence d'oscillations dans le système car on remarque que même pour les thermocouples où la température varie très peu, on dépasse le 1°C.

## **6. Injection directe à l'azote liquide**

De la façon que le système est conçu, il est possible de contourner l'échangeur de chaleur et d'injecter directement l'azote liquide à l'intérieur du système. Cette forme de refroidissement est intéressante à plusieurs points de vue. Elle permet de récupérer absolument toute la capacité de refroidir de l'azote. On peut non seulement profiter du bilan thermique nécessaire pour faire passer l'azote de l'état liquide à gazeux mais aussi

de la chaleur absorbée par l'azote entre  $-190^{\circ}\text{C}$  et la température de sortie du système. Évidemment, l'azote injecté dans la chambre passe directement à l'état gazeux, le point d'ébullition de l'azote étant d'environ  $-190^{\circ}\text{C}$  et il n'y a pas à se préoccuper de la présence de liquide dans le système. Un autre avantage est que nous ne sommes plus obligés d'utiliser de l'hélium.

Le test de la figure 4.2.6.1 montre les résultats qu'on a obtenus.



**Figure 4.2.6.1 – Test à injection directe avec le PID automatique.**

Ce test permet de faire plusieurs constatations. Notons tout d'abord au bout de 8h30, la répétition de l'anomalie qu'on avait observée dans le test à l'hélium lorsqu'on a manqué d'alimentation en azote liquide.

Les impulsions qu'on remarque autour de 5heures et demi, 7h45, 10h30 et 12h30 ont été causées par la mise en marche d'un ajustement automatique des gains du PID

automatique. On voulait étudier si les gains changeaient lors des différentes étapes. Le tableau 4.2.2.1 récapitule les gains obtenus.

**Tableau 4.2.6.1 – Variation des gains du PID selon les étapes.**

	Étape 1	Étape 2	Étape 3	Étape 4
$K_P$	0.4	0.6	1.1	1.3
$K_I$	16	25	17	26
$K_D$	2	4	3	4

On remarque que le gain  $K_P$  augmente pour chaque test. De plus, lorsqu'on observe la courbe de la température à l'entrée de la chambre, on voit qu'à l'étape 3, les oscillations de températures sont très importantes après avoir mis en marche la routine d'ajustement des pôles par contre à l'étape 4, après avoir mis en marche la routine, les oscillations diminuent. Ceci montre que le PID automatique n'est pas parfait, si jamais son approximation n'est pas très juste, il aura plus de difficulté à contrôler le système. Il ne semble pas y avoir de tendance pour les autres gains par contre on remarque que le gain  $K_I$  est très variable. Ces résultats montrent que si on veut avoir un bon contrôle sur les robots, il faudrait ajuster les gains du PID en fonction de la chaleur dégagée par les robots. On pourrait aussi utiliser un contrôleur qui peut s'ajuster automatiquement à ces changements tel un contrôleur *fuzzy logic* et *neural network*.

Pour ce qui est de la température de sortie, on atteint plus rapidement une température d'équilibre. Ceci peut être dû à l'ajustement des gains du PID à chaque étape mais il se peut aussi que l'azote liquide injecté directement dans le système à une plus grande puissance de refroidissement que l'hélium. L'hélium a un meilleur coefficient d'absorption de chaleur. Par contre, l'azote liquide, en se vaporisant dans le système, arrive à refroidir l'enceinte beaucoup plus rapidement que l'hélium. Ceci étant dit, lorsqu'on compare les tests à l'hélium et ceux à injection directe d'azote liquide, on remarque que les températures atteintes par les *DummyWalkers* sont plus élevées pour le test à injection directe. Le tableau 4.2.2.2 récapitule les résultats.

Tableau 4.2.6.2 – Comparaison du test à l'azote liquide avec celui à l'hélium.

	Hélium (He)			Azote Liquide (LN <sub>2</sub> )		
Température (°C)	Étape 2	Étape 3	Étape 4	Étape 2	Étape 3	Étape 4
Th. le plus chaud	0	45	75	15	65	105
Th. le plus froid	-30	-15	0	-15	5	25
Différence	30	60	75	30	60	80

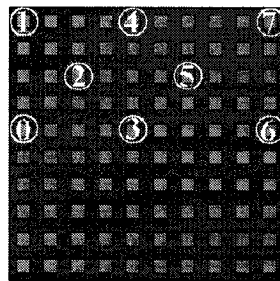
On remarque que pour les tests à injection directe d'azote liquide, même si la température d'entrée est la même à  $-50^{\circ}\text{C}$ , les températures sont plus élevées de  $15^{\circ}\text{C}$  à  $30^{\circ}\text{C}$ , dépendamment des étapes, que pour les tests à l'hélium. Par contre, on remarque que les différences de température sont presque identiques entre les deux tests. Donc même si l'hélium arrive à maintenir les *DummyWalkers* à des températures plus basses sans diminuer les écarts de température. Pour qu'un test à l'azote liquide arrive aux mêmes résultats que pour un test à l'hélium, il faudrait diminuer la température de référence pour combler la différence.

Le test à l'azote affiche beaucoup d'instabilités thermiques tandis que le test à l'hélium est très stable. Lorsque l'azote liquide s'évapore, il crée de nombreuses turbulences qui affectent le flux à l'intérieur de la chambre. Sachant qu'on désire réduire les variations de températures à l'intérieur de la chambre, on peut se demander si on préfère utiliser l'azote liquide à l'hélium lors de nos tests. De ce qu'on a vu, le système semble répondre plus rapidement à l'azote et on obtient les mêmes différences de températures qu'avec l'hélium. D'un autre côté, il exige de baisser la température d'entrée et de se rapprocher des limites de conception de la chambre actuelles ( $-100^{\circ}\text{C}$ ). Selon l'application, on pourrait préférer un ou l'autre des gaz. Pour une application où il y a de nombreux changements de puissance mais qui n'est pas sensible au bruit thermique, on pourrait utiliser l'azote liquide. Pour une application avec peu de variations de puissance mais avec une grande sensibilité aux changements de

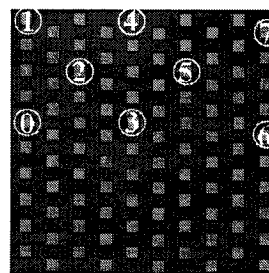
températures, on pourrait préférer l'hélium. Ceci étant dit, si il est possible d'isoler le STM des variations thermiques brusques, il serait préférable d'utiliser l'azote juste parce que cela coûterait rien en hélium. Ce gaz ayant une des molécules les plus petites, il est très difficile d'isoler un système surtout un volume aussi gros que le nôtre. Même avec beaucoup de travail pour réduire les fuites, un test de 12 heures nécessite cinq bonbonnes d'hélium de 50L. Il pourrait être intéressant de faire un test à l'hélium liquide, cela pourrait permettre de réunir l'avantage de l'hélium qui offre les températures les plus faibles tout en réunissant l'avantage de l'azote liquide qui offre le refroidissement le plus rapide de l'enceinte.

### C. Tests de caractérisation

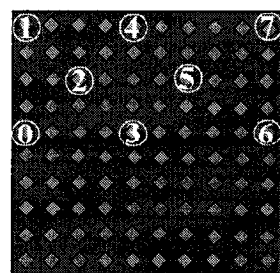
Pour ces tests, nous avons construit un nouveau *DummyFloor* afin d'offrir la possibilité de changer la disposition des robots. Avec cette nouvelle configuration, on peut placer les *DummyWalkers* de quatre différentes façons représentées sur la figure 4.3.1.



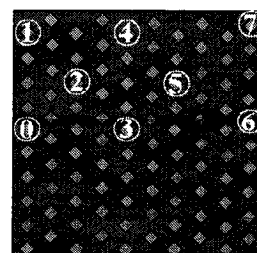
(a) Disposition en quadrillé



(b) Disposition décalé



(c) Disposition quadrillée en angle



(d) Disposition décalé et en angle

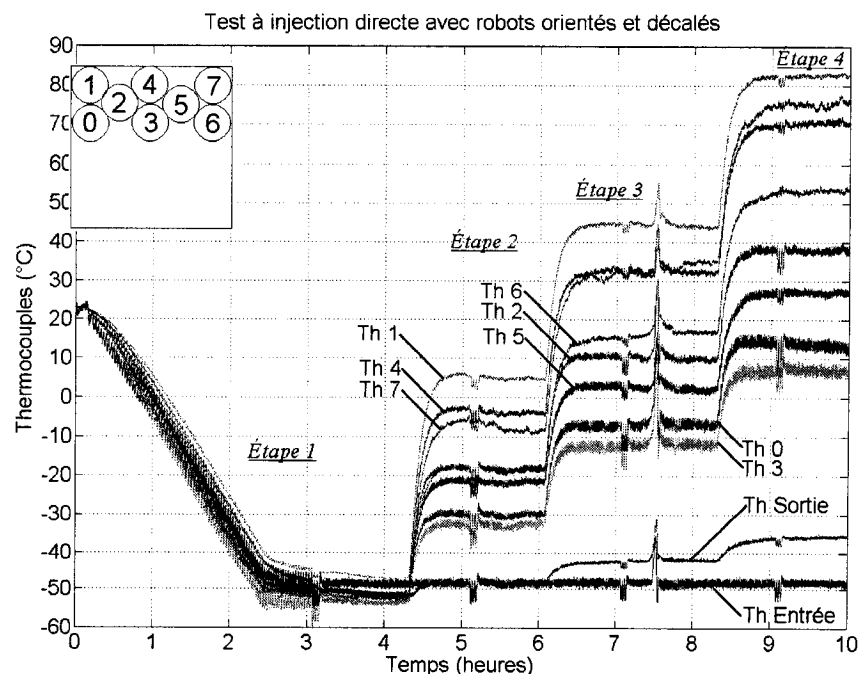
**Figure 4.3.1 – Différentes dispositions de DummyWalkers.**



Le test sur la disposition des robots en quadrillé (a) a déjà été effectué au test précédent. Uniquement un test de disposition a pu être effectué avant des bris du générateur de puissance et de connecteurs sur le *DummyFloor*. On a effectué un test avec la configuration (d) soit la disposition décalée et en angle.

On remarque que la température enregistrée à l'entrée de la chambre semble légèrement supérieure à la température à la sortie de la chambre. La seule explication plausible est que le thermocouple à l'entrée de la chambre s'est décalibré possiblement par un peu d'azote liquide qui aurait coulé jusqu'au thermocouple. Donc lors de l'analyse des tests, on ne peut pas se fier à la température à l'entrée de la chambre. On a donc étudié la différence de température entre la sortie de la chambre et celle des robots.

Le test est représenté sur la figure 4.3.2.



**Figure 4.3.2 – Test à injection direct avec disposition en angle et décalée.**

Les perturbations qu'on remarque autour de 3h15, 5h15, 7h15, 9h15 sont quand on a mis en marche le PID automatique. L'impulsion autour de 7h30 est quand on a remplacé la bonbonne d'azote liquide.

Le tableau 4.3.1 compare le test avec la disposition en quadrillé (a) au test avec la disposition décalée et en angle (d).

**Tableau 4.3.1 – Comparaison du test à l'azote liquide avec celui à l'hélium.**

<b>Disposition</b>	<b>Quadrillée (a)</b>			<b>Décalée en angle (d)</b>		
<b>Température (°C)</b>	<b>Étape 2</b>	<b>Étape 3</b>	<b>Étape 4</b>	<b>Étape 2</b>	<b>Étape 3</b>	<b>Étape 4</b>
<b>Température à la sortie</b>	<b>-40</b>	<b>-35</b>	<b>-25</b>	<b>-50</b>	<b>-40</b>	<b>-35</b>
<b>Th. le plus chaud</b>	<b>15</b>	<b>65</b>	<b>105</b>	<b>5</b>	<b>45</b>	<b>85</b>
<b>Différence avec la sortie</b>	<b>55</b>	<b>100</b>	<b>130</b>	<b>55</b>	<b>95</b>	<b>120</b>
<b>Th. le plus froid</b>	<b>-15</b>	<b>5</b>	<b>25</b>	<b>-35</b>	<b>-15</b>	<b>5</b>
<b>Différence avec la sortie</b>	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>30</b>

On observe que les écarts de températures entre les thermocouples les plus chauds et la sortie de la salle sont sensiblement pareils. Par contre, ce n'est pas le cas pour les thermocouples les plus froids, on remarque que pour le test avec la disposition (d), on est plus froid de 10°C à 20°C pour l'étape 2 à 4.

On constate que pour les deux tests à l'étape 4, on est à 80°C d'écart entre le thermocouple le plus chaud et le plus froid comparativement à 60°C pour l'étape 3. La disposition n'aura donc pas eu d'effet sur les écarts de température pour ces deux étapes proches des conditions critiques pour l'électronique.

On remarque encore qu'avec l'azote liquide on atteint un régime permanent à chaque étape. Il serait intéressant de refaire le même test à l'hélium pour savoir si il est possible d'atteindre un régime permanent, il faudrait aussi réajuster les gains à chaque étape à l'aide du PID automatique. S'il n'est pas possible d'atteindre un régime permanent pour un test utilisant l'hélium après un temps raisonnable, il faudra utiliser l'injection directe comme refroidissement. Si on découvre qu'il n'est pas possible d'utiliser de l'azote pour nos tests et qu'il est nécessaire d'utiliser l'hélium alors il faudra savoir si il est possible d'atteindre un régime permanent plus rapidement en contrôlant la température à la sortie de la chambre.

Ces résultats démontrent qu'un des paramètres d'optimisation à considérer serait la disposition de nos robots sur le *PowerFloor*. Lors de ce test, deux paramètres ont été modifiés à la fois soit l'angle et la disposition des robots sur le plancher. On a remarqué une diminution de la température des robots d'au moins 10°C mais aucun changement au niveau de la différence de température entre les robots. Pour compléter l'analyse, il serait intéressant de découpler les deux paramètres modifiés pour ce test (angle et disposition).

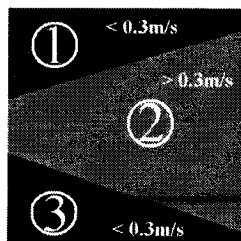
## V. DISCUSSION

### A. Limites de la chambre

#### 1. Puissance

Pour 100 robots d'environ 1 pouce cube répartis uniformément sur une surface de travail de  $1 \text{ m}^2$  refroidis à l'aide d'un flux horizontal d'hélium ou d'azote, la limite de puissance des robots que ce système peut refroidir est comprise entre 10W et 15W. Les modifications apportées à notre système auront permis de réduire significativement les oscillations de température et d'atteindre un régime permanent. À ce stade, l'amplitude des oscillations est comprise entre  $2^\circ\text{C}$  et  $5^\circ\text{C}$ . Le régime permanent prend moins d'une heure à atteindre.

Ces résultats ont été obtenus dans une chambre où le flux n'est pas uniforme. Avec un flux régulier d'au moins  $0.3\text{m/s}$  sur toute la surface de travail, il sera possible de conserver des robots dégageant 15W de puissance à l'intérieur des limites thermiques. Par contre, il sera toujours possible de ne pas placer de robots dans les zones où le flux est insuffisant. D'après nos figures sur la forme du flux, il est facile de déterminer les zones moins performantes (voir figure 4.4.1).



**Figure 5.1.1 – Représentation des zones avec un flux suffisant (2) et insuffisant (1) et (3).**

Tant que les robots restent à l'intérieur de la zone (2), ils pourront fonctionner à 15W. Si on veut contrôler des robots de plus de 15W, il faudrait soit conserver les robots dans une zone avec un débit plus élevé que 0.3m/s mais cette surface sera très petite ou bien il faut augmenter le débit.

Présentement, nous ne faisons qu'étudier la température à la surface des robots. Mais une question très importante doit être posée, est-ce que la température à l'intérieur des robots est très élevée? Normalement, les composants qui chauffent le plus seront à l'extérieur du robot mais de la façon que le circuit du robot est fait, il y aura des composants électroniques à l'intérieur des robots. Si jamais l'intérieur du robot est trop chaud, il faudrait avoir un moyen de faire transiter la chaleur vers l'extérieur du robot, par exemple à l'aide de *micro-heats pipes* sur lesquels on travaille au laboratoire.

## 2. Turbulences

Pour ce qui est des turbulences et des oscillations thermiques, il faut absolument déterminer la sensibilité du STM et du robot face à ce type de perturbation pour savoir si elles nous seront problématiques. On ne veut pas nécessairement faire complètement disparaître les turbulences dans le système pour la raison suivante, les turbulences permettent à la petite couche de gaz à la surface de l'objet, qui a déjà subi un échange considérable de chaleur, d'être retirée et remplacée par une nouvelle couche de gaz. La majorité de l'échange thermique se produit dans le voisinage au-dessus de la surface d'échange. Le rythme d'échange de chaleur est amélioré lorsqu'on fait en sorte que le gaz soit dirigé contre la surface d'échange et que par la suite il peut s'en éloigner rapidement. Introduire de la turbulence est un moyen efficace de réaliser ceci. Si le robot est trop sensible aux turbulences, on aura besoin d'un flux laminaire. Pour ce qui est des gradients thermiques, c'est surtout le STM qui nous inquiète. Il faudra trouver un moyen de l'isoler des gradients thermiques s'il leur est très sensible.

### 3. Influence du nombre et de la grosseur des robots

L'étude aura montrée qu'il était possible de contrôler la température moyenne d'une flotte de 100 robots à différentes températures mais la performance n'était pas suffisante pour assurer le fonctionnement des robots à puissance plus élevée que 10W.

En supprimant certains robots sur la surface de travail, il sera possible de contrôler la température de robots dégageant plus que 10W chacun dans la mesure où on ne s'éloigne pas d'une puissance totale de 1000W. Ainsi, toute taille égale par ailleurs, si on peut négliger l'échange thermique entre les robots, on sera à l'intérieur des limites thermiques de fonctionnement pour 36 robots qui dégagent 26W (1000W en tout) répartis en quadrillé de façon à maximiser la surface de travail. Si on double la quantité de robots sur la surface de travail, on devrait rester à l'intérieur des limites thermiques avec 200 robots dégageant 5 W de puissance chacun. Il faudrait effectuer un test pour valider cette proposition.

En diminuant la grosseur des robots on affectera aussi la capacité des robots d'échanger la chaleur. Plus le robot est petit, moins la convection forcée est efficace. Il est possible de réaliser un modèle qui simule le comportement du système qu'on pourra comparer aux résultats de nos tests. Ceci étant fait, on peut modifier les paramètres des robots comme leur grosseur et leur nombre et ainsi déterminer l'influence de ces deux paramètres sur le système. Avec le *DummyFloor* actuel, il est possible d'étudier le comportement du système selon le nombre de robots sur la surface de travail mais pas de la grosseur des robots.

## B. AUTRES CONSIDÉRATIONS

Un travail considérable a été effectué pour déterminer les limites thermiques du système mais il reste toujours des tests à effectuer. Ce chapitre va présenter les tests à

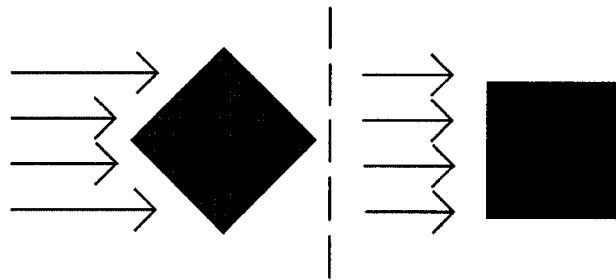
compléter qui permettront d'aider à la réalisation d'un modèle pour la simulation. Il sera aussi présenté une architecture de contrôle issue de l'expérience acquise sur la chambre. Il n'aura pas été possible d'implanter cette architecture les tests n'ayant pas été complétés. Enfin, ce travail aura permis d'identifier des obstacles et de faire des recommandations.

## 1. Tests futurs

### a) Tests de dispositions

Les tests de dispositions n'étant pas complétés, il restera à faire un test sur les robots disposés en quadrillage et en angle soit le (c) dans la figure 4.3.1 ainsi qu'un test sur les robots dans la configuration décalée (b).

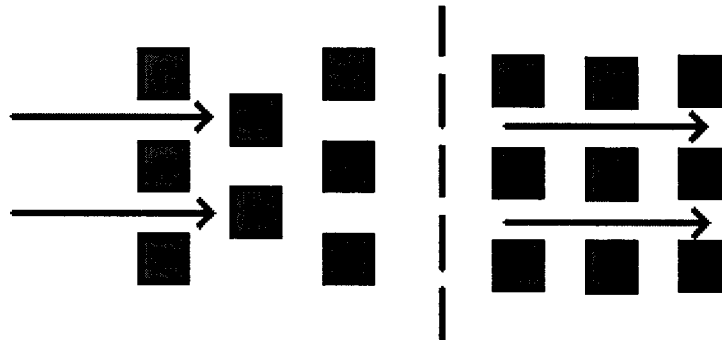
La configuration (c) devrait permettre de montrer à quel point l'orientation des robots par rapport au flux affecte sa résistance thermique.



**Figure 5.2.1 – Surface qui réagit avec le flux selon l'angle du robot.**

L'efficacité de la convection forcée dépend de la surface. Alors sur la figure 5.2.1, si un robot se place selon le dessin de gauche, il devrait être plus froid que le robot sur le dessin de droite car le flux atteint une plus grande surface sur le dessin de gauche que sur le dessin de droite.

La configuration (b) devrait permettre de montrer à quel point la disposition des robots peut affecter le flux.



**Figure 5.2.2 – Mouvement du flux entre les robots selon leur disposition.**

L'efficacité de la convection forcée dépend aussi du flux qui atteint le robot. Alors sur la figure 5.2.2, les robots de la seconde rangée sur le dessin de gauche font écran aux robots sur la troisième rangée.

Les tests avec les configurations (b) et (c) devraient permettre d'obtenir de meilleures conclusions combinées aux résultats qu'on a obtenus pour le test avec la disposition (d) des robots.

### **b) Tests de déplacements**

Lorsque les robots auront la capacité de se déplacer, il faudra trouver la vitesse du flux qui nuit aux déplacements des robots.

Les tests de déplacements auront aussi une autre utilité. Lorsque le robot se rapprochera d'un autre robot sa température va augmenter. Il faudra étudier à quel point la distance à un effet sur la température du robot et ainsi trouver une fonction qui relie la température à la distance entre deux robots. On peut aussi utiliser cette relation à des fins de contrôle de la température. Selon la région dans laquelle se retrouvent les robots, on



voudrait peut-être coller les robots qui sont moins chauds tandis qu'on voudrait éloigner les robots qui sont trop chauds. On pourrait aussi disposer les échantillons de travail sur la surface de travail selon ces résultats.

### **c) Autres tests**

Il y a aussi d'autres tests qu'il faudra effectuer pour déterminer les limites de fonctionnement en puissance des robots selon le nombre de robots sur la surface de travail et leurs dimensions.

On a observé que c'est seulement après avoir commencé à utiliser l'injection directe qu'on a réussi à atteindre le régime permanent, en contrôlant la température à l'entrée de la chambre, en moins d'une heure. Il faudra déterminer si en modifiant les gains du PID automatique à chaque étape on peut atteindre le régime permanent à l'hélium.

Tous les tests présentés ont été fait avec la même vitesse de rotation du moteur de la souffleuse, il faudrait déterminer la relation entre la vitesse d'écoulement et les différences de température du système et la forme du flux dans le système.

Il faudrait aussi essayer un test où on contrôle à l'aide du PID automatique la température à la sortie de la salle. Et aussi des tests qui permettront de déterminer la hauteur, qu'il faut avoir au dessus de la surface de travail, à partir de laquelle on commence à réduire l'efficacité du système de refroidissement.

Enfin, il faudrait déterminer si on sera capable de découpler les vibrations mécaniques, causées par la souffleuse, du *PowerFloor*.

## ***C. Recommandations pour le projet NanoWalker***

### **1. Pour le robot**

Si on veut utiliser la chambre dans son état actuel pour 100 robots, il faudra réduire la consommation du robot à 10W.

Étant donné que la convection forcée est utilisée pour refroidir les robots, il faudrait placer les pièces qui chauffent le plus sur le dessus du robot, le flux ayant plus de difficulté à atteindre les composants sur les faces sur le côté du robot. Un autre avantage d'avoir les composants les plus chauds sur le dessus du robot est qu'ils sont éloignés du STM donc ils vont moins l'affecter thermiquement.

Il faudrait aussi essayer d'isoler le STM du flux car il risque d'affecter son fonctionnement. Si on s'assure que les composants les plus chauds n'affectent pas la température du STM, on pourrait isoler le STM du flux. Il faudrait juste s'assurer qu'on arrive à maintenir la température constante autour du STM.

Un des avantages d'utiliser un STM est que le robot peut analyser l'échantillon de travail avec n'importe quel angle de rotation. On désire développer un échangeur de chaleur spécial qui entourerait le robot et lui permettrait de changer sa résistance thermique selon son angle par rapport au flux. Ceci lui permettrait d'augmenter ou diminuer sa résistance thermique, et donc sa température, selon qu'il est sous ou au-dessus de la température de référence. On aurait donc une forme de contrôle individuel de la température des robots quelque chose qui est impossible avec la configuration actuelle. Une autre façon plus simple mais moins efficace pour contrôler la température individuelle des robots est de rapprocher les robots moins chauds et d'éloigner ceux qui sont plus chauds.

Idéalement, il faudrait combiner plusieurs méthodes d'échanges de chaleur. Par exemple, il serait possible d'ajouter un dispositif à effet Peltier au robot qui permettrait de transférer la chaleur excessive qui s'accumule sur toutes ses faces jusqu'à la surface du dessus même si ceci signifie grossir le robot.

## **2. Pour la chambre de refroidissement**

Pour commencer, il faudrait savoir jusqu'à combien on peut augmenter la vitesse du flux sans que celui-ci affecte les déplacements ou bien le fonctionnement du robot. Il faudrait aussi savoir à quel point les turbulences vont affecter le robot. D'après nos résultats, un flux horizontal arrivera à refroidir la flotte de robots. Si les robots sont tous placés dans la zone où le flux est compris entre 0.3m/s et 0.5m/s, on n'aura aucun problème à contrôler des robots de 15W.

L'idéal serait d'avoir un flux le plus uniforme possible au dessus de la surface de travail. Pour réaliser un flux de ce type, il faudrait augmenter la longueur du diffuseur. Présentement le flux entre dans le diffuseur avec une vitesse trop élevée et n'a pas le temps de ralentir et de devenir uniforme au-dessus de la surface de travail. De plus, le diffuseur n'épouse pas toute la largeur de la chambre, il y aura donc nécessairement une zone morte. Ceci signifie qu'il faudrait à nouveau apporter des changements à la chambre.

Il pourrait aussi être souhaitable de modifier le poste de travail. Il faudrait concevoir un système qui nous permette d'aller chercher toutes les variables de contrôle et qui soit conçu pour être contrôlé à partir d'un ordinateur externe tout en conservant la possibilité d'utiliser un PID automatique. Le poste de travail devrait permettre une plus grande flexibilité pour éviter à avoir à sacrifier une fonction pour en intégrer une nouvelle.

## VI. CONCLUSION

La chambre de refroidissement développée au laboratoire de NanoRobotique de l'École Polytechnique de Montréal a subi plusieurs modifications. Les tests de caractérisation auront montré qu'il est possible, avec un flux horizontal d'hélium ou d'azote comme gaz de refroidissement, de stabiliser la température d'une flotte de 100 robots dégageant 10W de puissance chacun. La différence de température pour 10W par robot entre le robot le plus chaud et le plus froid aura été de 60°C. Pour une flotte de robots dégageant 15W de puissance chacun, les tests auront montré qu'on atteignait la marge de manœuvre limite de 70°C qui s'applique à l'électronique conventionnelle.

On aura montré qu'utiliser juste de l'air, comme gaz de refroidissement sans injection directe, était suffisant pour refroidir une flotte de robots à 5W chaque mais insuffisant pour refroidir des robots à 10W. De plus, il a été démontré que contrôler la température à l'entrée de la chambre permettait de réduire les oscillations thermiques qu'on retrouvait à l'intérieur du système comparé à contrôler la température à la sortie du système mais qu'il était alors plus difficile d'atteindre un régime permanent. À l'aide d'un bon contrôleur tel un PID automatique, on peut réduire les oscillations du système mais il n'est toujours pas clair si à lui seul il peut faire en sorte qu'on atteigne un régime permanent pour les tests à l'hélium. Par contre, lorsqu'on combine le PID automatique à des tests à injection directe d'azote, on a atteint un régime permanent à chaque étape des tests. Il semble par contre que l'azote liquide cause des turbulences dans le système plus que l'hélium.

Les tests montrent à quel point la vitesse du flux qui circule autour des robots est le paramètre le plus important qui affecte la température des robots. Les robots dans les zones avec des flux plus élevés sont moins chauds que ceux qui ne le sont pas quelle que soit leur position sur la surface de travail. Le gaz dont la température augmente entre

l'entrée et la sortie de la chambre affecte aussi la température des robots mais à un degré moindre.

L'enceinte est surdimensionnée, réduire le volume de la salle de moitié n'aura en rien modifié le comportement du système. Il sera donc possible de superposer des surfaces de travail.

Enfin, la disposition des robots a un effet sur le comportement du système. À première vue, il semble que l'angle d'attaque donc la surface d'échange et la disposition des rangs des robots par rapport au flux a une influence sur la résistance thermique. Ces points restent à éclaircir.

Notre approche bien qu'empirique était nécessaire pour aborder une structure aussi complexe. Cependant, elle gagnerait à être couplée à de la recherche en mécanique des fluides et en thermodynamique pour mieux comprendre les limites théoriques et les phénomènes. Cette étude est loin d'avoir pu tester les contraintes qui apparaîtront au niveau nanométrique tels la turbulence, les vibrations et les gradients thermiques mais c'est un premier pas.

## BIBLIOGRAPHIE

- APC INTERNATIONAL. Piezoelectricity. [En ligne].  
[http://www.americanpiezo.com/piezo\\_theory/index.html](http://www.americanpiezo.com/piezo_theory/index.html) (Page consultée le 07 April 2006).
- ASSOCIATION CANADIENNE DE NORMALISATION 1992. *Vocabulaire des technologies de l'information (CAN/CSA-Z243.58-92)*. Rexdale, Ontario, Canada.
- BASELT, D. 1993. *The tip-sample interaction in atomic force microscopy and its implications for biological applications*. Thèse de Doctorat, California Institute of Technology.
- BAUMANN, G. 2003. *Development and Testing of a Positioning System for a Miniature Robot called NanoWalker*. 103 p. Université de Karlsruhe.
- BEY OUESLATI, R. 2006. *Thèse à venir*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.
- BOITANI, T. 2003. *Design and control of a Scanning Tunneling Microscope for a miniature autonomous instrumented robot called NanoWalker*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.
- DUMAS, P.-A. 2003. *Validation et réalisation d'une grille de référence et conception d'algorithmes de traitement de signal en vue d'obtenir un positionnement de précision nanométrique*. 46 p. Rapport de projet de maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.

- FORTIN, M.-A. 2005. *Alimentation intermittente d'un robot miniature et sans-fil, synchronisée avec ses déplacements*. 189 p. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.
- MACICIOR, H. 2004. *Contrôle de température de la chambre de refroidissement des NanoWalkers*. 121 p. Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.
- MARTEL S., MADDEN P., SOSNOWSKI L., HUNTER I., LAFONTAINE S. 1999. "NanoWalker: a fully autonomous highly integrated miniature robot for nano-scale measurements". *Proceedings of the European Optical Society (EOS) and SPIE International Symposium on Environsense, Microsystems Metrology and Inspection*. Volume 3825.
- MARTEL S., SCHINDLER A., BAUMANN G., RIEBEL S., BOITANI T. 2003. "Cooling platform for an automated nanofactory based on a fleet of miniature robots designed for atomic scale operations". *IEEE Automation*.
- NATASHA LODER. 2004. "Small Wonders - A Survey of Nanotechnology". Anon. *The Economist*.
- NAVE, C.R. Heat Transfer. [En ligne]. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html> (Page consultée le 05 December 2006)
- OBSERVATOIRE FRANÇAIS DES TECHNIQUES AVANCÉES 1992. *Nanotechnologies et micromachines*. Paris, France : Masson.
- PHYSIK INSTRUMENTE. Piezo Actuators and PZT NanoPositioning Systems: PI Products, Theory and Applications. Un Site de Physik Instrumente. [En ligne]. <http://www.physikinstrumente.com/tutorial/index.html> (Page consultée le 04 March 2006).

- SCHINDLER, A. 2002. *Development of a Cooling System for miniature robots*. 101 p. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.
- ST-JACQUES, D. 2004. *Conception d'une architecture logicielle pour le positionnement au niveau atomique d'instruments scientifiques sous forme de robots miniatures pour des applications en nanotechnologies*. 190 p. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.
- WIKIPEDIA. Effet Peltier. [En ligne]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_Peltier](http://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_Peltier) (Page consultée le 04 Mai 2006).
- WIKIPEDIA. Convection. [En ligne]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Convection> (Page consultée le 06 November 2006).
- WIKIPEDIA. Thermal radiation. [En ligne]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_radiation](http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_radiation) (Page consultée le 06 November 2006).
- YOUNG, R., WARD, J., SCIRE, F. 1972. "The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopography". *Review of Scientific Instruments*. 43:7. 999-1011.
- YOUNG, R.D. 1966. "Field Emission Ultramicrometer". *Review of Scientific Instruments*. 37:3. 275-278.
- YOUNG, R.D. 1971. Anon. *Physics Today*. 24 : 42.
- YOUNG., R.D., WARD, J., SCIRE, F. 1971. "Observation of Metal-Vacuum-Metal Tunneling, Field Emission, and the Transition Region". Anon. *Physical Review Letters*. 922-924.
- ZHANG, J.Y. 2006. *Thèse à venir*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de



Montréal - Département de Génie Électrique et de Génie Informatique.